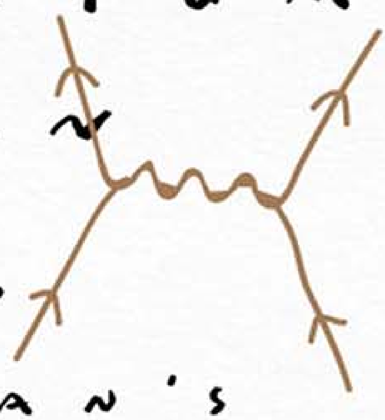


QUANTUM MAN

理查德·费曼传



RICHARD FEYNMAN'S LIFE IN SCIENCE

他是个天才！

Lawrence M. Krauss

[美] 劳伦斯·M. 克劳斯——著

张彧彧 陈亚坤 孔垂鹏——译

中信出版集团

版权信息

书名:理查德·费曼传

作者:[美]劳伦斯·M.克劳斯

译者:张彧彧 陈亚坤 孔垂鹏

ISBN:9787521707083

中信出版集团制作发行

序言

理查德·费曼是20世纪后半叶最重要的理论物理学家之一。他的影响长盛不衰，已经远远超出了物理学界，甚至成为当代文化的一部分。随着互联网的兴起，他的著作、演讲、采访得以更广泛地流传。在去世多年的20世纪科学家中，他在公众中的影响大概仅次于爱因斯坦。

费曼的原创风格带来了他一生最大的成就——量子力学的路径积分表述，他以此解决了量子电动力学的重正化以及其他很多问题。他对弱相互作用的所谓V–A（矢量–轴矢量）理论的重视反映了他对自然基本定律的崇拜。

费曼的言行和风格反映出他有一种少年心态，对科学怀抱着纯粹的热情，他对物理学的若干领域都做出了贡献。他所感兴趣的很多领域在当今时代正在蓬勃发展，比如纳米技术、量子计算、生物学。1959年年底在加州理工学院召开的美国物理学会年会上，费曼发表了著名的演讲“在底部还有很大空间”，讨论了在非常小的尺度上操纵和控制物体的前景。费曼的很多预见在如今的前沿科技领域已经成为现实，如存储信息所需体积的快速缩小、分子尺度上的生物学，以及观察和操控单原子等。2018年获得诺贝尔物理学奖的光镊技术就与之关系密切。

在教学和科普上，费曼也树立起了独特的丰碑。他的每一堂课和每一部科普作品都展示了物理学家思考自然的方式。他在加州理工学院为大一新生讲授的物理学入门课程被整理成《费曼物理学讲义》，影响力经久不衰。其中一段话是费曼教学思想的完美写照：“我教学的

主要目的不是为你们准备某个考试——甚至也不是让你们为工业或国防服务做准备。我最想教给你们对于这个精彩世界的欣赏和物理学家看待它的方式，我相信这是现代文化的一个主要部分。”

我认为，费曼幼时受到的父亲的引导对他的一生产生了重大的影响，他后来特立独行的行为特点和科学风格都起源于此。他小时候，父亲引导他区分事物的名字和真正的知识，比如，了解一只鸟，并不在于知道它叫什么名字；观察一件事物要看它在做什么，为什么这么做。费曼发现，突然推动玩具车，车上的小球会向后滚动；突然停止玩具车，车上的小球则会向前滚动。父亲没有告诉他“惯性”这个名词，而是告诉他，运动的物体倾向于保持运动，静止的物体倾向于保持静止。在制服公司工作的父亲还教育他不惧权威，因为权威只来自职位和制服。成年后的费曼认为他父亲具有科学家的精神，知道怎么寻找真实、持久和实验可验证的东西，从现象出发找到原理，通过自己的仔细观察来了解事物。

数学家卡茨说，世界上有两种天才，普通的天才没什么神秘的，而魔术师式的天才不一样，他们大脑的工作方式无法让人理解，理查德·费曼就是最高层次的魔术师。

费曼这位最高层次的魔术师是如何变出他的魔术的?

如果你要读一篇文章，可以去读我的《费曼百年》，2018年发表于《知识分子》微信公众号和《科学》杂志。

如果你要读一本书，我这里非常高兴地向大家推荐这本费曼传记，原名为“*Quantum Man*”（“量子人”的意思）。作为一本书，它的篇幅是精炼的。作者劳伦斯·克劳斯是理论物理学家兼科学作家，他在讲述费曼经历的同时，用通俗的语言系统地介绍了费曼研究物理学的方法，向广大读者介绍了费曼对物理学的伟大贡献。读了这本书，读者在更深刻地了解费曼其人的同时，也能不知不觉地理解那些让费曼着迷的物理学究竟是怎么回事。

让我们一起走近费曼这个迷人的人物，走进他心目中迷人的物理。

施郁
复旦大学物理学系教授
理论物理学家、科学作家

前言

> 我发现物理是一个绝妙的东西。我们将诸多已知约化为寥寥几个方程，此外我们仍知之甚少。
>
> ——理查德·费曼，1947年

回忆儿时，人们往往很难分辨某段记忆究竟是真实发生过，还是只是想象。但我十分清晰地记得第一次萌生这一念头的情形：做一名物理学家或许真的会令人兴奋。我自小对科学着迷，但彼时我所触及的都是一些落后于当时至少半个世纪的科学。与其说是科学，倒不如说是历史。那时的我还没有意识到，神奇的自然界尚有很多未解之谜。

高中有一年参加暑期科学项目时，我突然领悟了。不知是不是察觉到我当时对课程有些不感兴趣，我的老师在坚持既定的课程安排的同时，扔给我一本理查德·费曼的《物理定律的本性》（*The Character of Physical Law*），让我阅读其中关于过去和未来区别的章节。这是我第一次接触熵和无序度的概念。就像许多前辈一样，这些概念令我感到迷惑甚至沮丧，而伟大的物理学家路德维希·玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann）和保罗·埃伦费斯特（Paul Ehrenfest）甚至在耗费毕生精力研究这一课题之后选择了自杀。我无法理解世界是如何由简入繁地变化的：从简单的两体问题（比如地球和月球），推广至多体问题，比如此刻我在其中敲击键盘的房间里那些气体分子的运动，这些问题既微妙又深刻。毫无疑问，对于当时的我来说，这些问题过于微妙和深刻了。

但到了第二天，我的老师问我是否听说过反物质，接着又告诉我那本书的作者费曼，刚刚因为阐释了反粒子可以被看作正常粒子沿时间轴反向运动而获得了诺贝尔奖。这太吸引人了，尽管我并不了解个中细节（回想起来，好像我的老师也不是很了解），但这些激动人心的发现在我生活的时代产生，这激励了我，让我认识到还有很多领域值得探索。（事实上，尽管我的结论是对的，但我得此结论所依据的信息却并不准确。大约在我出生的10年之前，费曼就发表了与他获奖相关的量子电动力学论文，而那个反粒子可以被看作正常粒子沿时间轴反向运动的想法甚至根本不是费曼的。当传播到高中老师和教材里时，这一物理思想已接近“中年”了，而且往往偏离了原貌。）

在我后来学习和研究物理的过程中，费曼成了我，或者说成了一整代物理人心目中的英雄和传奇。进入大学的时候，我和其他许多有志于物理研究的青年学子一样购买了《费曼物理学讲义》（*Feynman Lectures on Physics*）这套书，虽然实际上它并非任何一门课程的指定教材。但是正像很多同龄人一样，即使我们的水平早已超越了大学物理入门课程的难度，我们还是会不时地参阅此书。正是在阅读这些讲义的过程中，我吃惊地发现，我在那次高中暑期项目中的体验与费曼高中时的一段奇特经历何其相似。这一点我们稍后详谈。现在我只想说，我真希望我的经历也能带来和费曼的少年往事一样意义重大的结果。

直到进入研究生院学习，我才明白当初暑期科学项目里的科学老师试图介绍给我的是怎样的一个科学分支，但在很大程度上，我对基本粒子世界的兴致，以及对为基本粒子著书立说的这位“妙人”费曼的痴迷，都始于高中暑校的那个早晨，且从未停止。写到这里，我突然意识到，我撰写的毕业论文是关于路径积分的，而这一领域正是由费曼开辟的。

神奇的命运使我有幸在本科学习阶段遇到了理查德·费曼，并与他共度了一段时光。那时我加入了一个叫作“加拿大本科生物理协会”的

组织，这个组织的唯一目标就是组织一次全国性质的会议，请一些杰出的物理学家在会上做学术报告，同时与会的本科生将展示他们在暑期研究中的成果。如果我没记错的话，那应该是1974年，费曼被极富个人魅力的协会主席说服（也可能是被引诱，总之我说不清楚，也不该妄加揣度），作为大会主讲人参加了在温哥华举行的会议。在他做完大会报告后，我斗胆向他提了一个问题，这一切被一名国家级杂志的摄影记者拍了下来，并刊登了出去。然而更为重要的是，我是带着女友一块儿去的，并且在随后那个周末的大部分时间里，费曼都和我们俩一起混迹于温哥华当地的一些酒吧。

本科毕业后，我去了麻省理工学院的研究生院并聆听了几次费曼的学术报告。又过了几年，我获得了博士学位，而后到了哈佛大学。在加州理工学院举行的一次学术讨论会上做报告时，我又遇到了费曼，他坐在听众席里，让我略感紧张。他很有礼貌地问了一两个问题，并且在讨论会正式结束后还继续与我交流。我想他已经忘记了我们在温哥华的会面，而没能跟他本人确认他是否还记得那件事则成了我的一桩终生憾事。没办法，就在他很耐心地等待着跟我交谈的时候，一名执着且讨厌的年轻助理教授霸占了讨论，直到费曼终于离开了会场。自此以后，我再未见过费曼，而过了几年，他就离开了人世。

早在进入公众视野之前，理查德·费曼就已经成为整整一代物理学家心目中的传奇人物。获得诺贝尔奖或许让费曼登上了世界各地的报纸头条，但是第二天，同样的位置就会被更具时效性的内容取代，每一天的头条并不会在人们的记忆中留存很久，正如每天的报纸一样。费曼的声名鹊起并非源于他的科学贡献本身，而是源于一系列回溯他个人生平的书籍。透过这些回忆录，我们可以看到这位天才物理学家同时还是一位才华横溢、妙语连珠的讲故事的高手。那些哪怕只是与费曼有过一面之缘的人，也一定会被他超凡的个人魅力所征服。他有着深邃的目光、顽皮的浅笑，说话一口纽约腔，这一切与刻板的科学

家形象格格不入。而他对诸如邦戈鼓注和脱衣舞酒吧之类事物的痴迷，更为他本已超脱的人生增添了神秘色彩。

然而，真正使费曼成为公众人物的是一次令人始料不及的悲剧性事故：挑战者号航天飞机在升空不久后发生了爆炸，遇难者中包括美国首名参加太空飞行的“普通公民”——一名公立学校的老师。按照原本的计划，她将在太空中为学生授课。在随后展开的事故调查中，美国国家航空航天局（NASA）邀请费曼加入了调查委员会。以往他刻意回避任何委员会，以及会妨碍他展开科学工作的其他人或事情，但这次一反常态的是，他接受了邀请。

费曼用他自己的方式进行了调查，其调查方式同样独树一帜。他并没有在办公室里研究卷帙浩繁的事故报告和未来如何避免事故的那些官僚文牍，而是直接与NASA的工程师和科学家对话。在一次非常著名的电视听证会上，费曼做了一个实验，将一个小的O型橡胶密封圈放进一杯冰水里，从而证明了挑战者号所采用的橡胶密封圈处于事故当天的低温条件下会失去本该有的密封功能。

那场听证会之后，关于费曼旧闻逸事的书籍、个人书信汇编和一些“失而复得”的演讲录音纷纷涌现，甚至直到他去世，类似的资料依然层出不穷。传记类畅销书也相继付梓，其中最出名的就是詹姆斯·格雷克（James Gleick）所著的《费曼传》（*Genius*）。

费曼其人其事将会持续散发其魅力，当有人约请我从其科学贡献的视角来撰写一本反映费曼一生的简短、亲切的作品时，我感到义不容辞。这一创作让我干劲儿十足，因为我有机会阅读他留下的原始文献了。（很多人可能意识不到，科学家其实很少去挖掘自己所在领域的早期文献，尤其是那些几十年前的老文献。这是因为科学思想几经提炼和升华，最新的物理表述往往已远远脱离了它们最初的形态，即使它们描述的是同样的物理过程。）但更重要的是，我意识到，费曼的物理学为20世纪后半叶微观世界物理问题的关键进展提供了理论视角，而他留下的许多谜题至今仍然悬而未决。

在本书接下来的部分，我将尽量站在费曼的立场，忠实而客观地呈现他的观点及其思想内涵。而正因如此，本书的首要目的是在个人科学传记的背景下，讲述费曼如何影响了我们对客观物质世界的理解。我将不会花太多笔墨描写物理学家在探索科学的过程中走过的弯路和死胡同，虽然哪怕最成功的科学家都曾被这些歧路吸引，费曼也不例外。对于非专业人士来说，要正确理解物理学家对自然世界的了解已属不易，因此，我们不必再去整理更多花哨却错误的提法而使读者们误入歧途。尽管其中不乏巧妙而机智的观点，但归根结底，我们的重点在于那些经历了时间检验而被实验证实的理论。

我的小小的目标是聚焦于费曼给我们留下的科学财富，这些财富影响了20世纪物理学的革命性发展，并将继续对21世纪一些物理学谜题的解开造成影响。我真正想要向非物理学从业者揭示的是，为何费曼能够被大多数当世物理学家奉为神坛之上的英雄。如果我能够做到这一点，将有助于读者理解现代物理学的一些核心内容，以及费曼在改变我们的世界图景中所起到的作用。于我而言，这些是我能为理查德·费曼这位天才所做的最佳证明。

---

1. 邦戈鼓（bongo drum）是一种用手指敲击的古巴黑人小型鼓，主要用于拉丁美洲的舞蹈音乐中。——译者注

第一部分

通向伟大的路径

科学教会了人们事物是如何被理解的，什么是未知的，我们对已知事物的了解达到了何种程度（事实上，我们不可能知道全部），如何对待疑惑和不确定性，我们的证据依赖怎样的法则，如何思考并做出正确的判断，如何透过骗术与表象来看清事实。

——理查德·费曼

第1章

真相往往很简单

> 如果你能用几种不同的方式将同一件事完整地描述出来，却不能立刻意识到这些描述指的是同一件事，那这件事很可能是很简单的。
>
> ——理查德·费曼

当理查德·费曼还是个孩子的时候，是否有人曾经料到，他将成为或许是20世纪后半叶最伟大，很可能也是最受人爱戴的物理学家？这个问题的答案依然模糊不清，但种种迹象早已露出端倪：儿时的费曼极其聪明。他有一位尽职的父亲，经常和他一起玩智力游戏，循循善诱地让小费曼逐渐爱上了学习，激发他与生俱来的好奇心，并尽可能地拓宽其视野。小费曼拥有自己的家庭化学实验室，并对收音机表现出了极大的兴趣。

但是在当时，这些迹象在其他聪明小孩身上也很常见。从各方面来看，儿时的理查德·费曼也不过就是第一次世界大战之后在长岛成长起来的一个典型的聪明的犹太小孩。然而，这一简单的事实或许正是决定了他未来人生高度的重要因素之一。费曼有着异常敏锐的思维，但他依然脚踏实地，即使他被驱使着去探索关乎人类存在的那些最深奥的领域时，也是如此。费曼对于浮夸的厌恶来自他的童年生活，儿时的他没有接触过那些虚与委蛇；而他对于权威的蔑视则不仅仅源于培养了其独立意识的父亲，还因为他是一个自由的孩子，可以自由地追随自己的兴趣，也承受得起犯错的代价。

成就其伟大的第一个迹象或许就是费曼不倦的耐心，他可以专注于一个问题几个小时之久，而这种孜孜以求的态度甚至让他的父母有所担忧。10多岁的费曼痴迷于收音机，甚至做起了修收音机的小生意。但与一般修理匠不同的是，费曼并不是简单地修修补补，同时也很乐于通过思考来解决收音机的问题。

费曼在修理收音机的时候不仅展现了他非同寻常的专注力，还展示了他的表演天赋。他最有名的一次修理收音机的经历是这样的：客户只要一打开收音机，就会听到刺耳的尖啸。费曼一边在屋里来回踱步，一边思考。最终，年轻的费曼从收音机里拽出了两根管子，将它们的位置互换，又插了回去。收音机就这样被修好了。其实我怀疑，费曼是故意放慢了节奏，让整个修理的过程变得更长，而理由仅仅是，这样做更具"表演"的效果。

类似的情形在费曼后来的生活中又再次上演，这一次是有人邀请充满质疑精神的费曼去检查一张令人费解的气泡室（一种用来显示基本粒子轨迹的装置）照片。经过一番思考，费曼先生用手里的铅笔指向了照片中的一点，并声称就在这一点应该有一道闪光，由一次意料之外的粒子碰撞造成，只是工作人员没有记录下来。正是因为没有观察到这一闪光，对实验结果的解释将向错误的方向发展。结果可想而知，当实验人员回到实验设备前重新进行观察时，他们看到了那一道闪光。

费曼的表演天赋的确为其个人传奇增色不少，然而无论是这一天赋，还是他后来对女性的贪恋，都不是他的科学探索中的重要因素。他面对问题时心无旁骛的执着，以及异乎常人的精力，才是推进其事业发展的根本所在。除此之外，还有一个因素可谓锦上添花，最终成就了费曼的卓越造诣，那就是他无与伦比的数学天赋。

费曼在高中时代就逐渐展露了他的数学才能。高中二年级的时候，费曼便自学了三角学、高等代数、无穷级数、解析几何以及微积分！就在自学这些知识的同时，费曼的另一特质也在逐渐形成：他会

按照自己的方式重塑所有的知识，经常发明新的表达方式或公式来表达自己的理解。有时候，需求就是创造之源。1933年，年仅15岁的费曼在为一本手册输入复杂的数学公式时，因为通常的打字机上没有合适的数学符号来表示合适的数学运算，他便发明了一套“打字机用数学符号”，并为自己开发的积分表创建了一套新的表示记号。

进入麻省理工学院后，费曼最初打算主修数学，然而事后证明这偏离了他的本意。尽管他热爱数学，但他更想知道他能用数学“做什么”。费曼把这个问题抛给了数学系的主任，然后他得到了两个不同的答案：一个答案是，数学可以用于保险概算；另一个答案却是，“如果你一定要问这个问题，那么你不该来数学系”。这两个答案都没有引起费曼的共鸣，他认为数学不适合自己，因此转到了电气工程专业。有趣的是，这一转折似乎有点儿太极端了。如果数学是一个不强调实用性的学科，那么工程学则太看重应用了。然而，物理之于费曼，恰如金发姑娘的汤(注)，是“刚刚好”的。在大学一年级结束时，费曼转到了物理专业。

这无疑是一个令费曼感到振奋的选择。凭借着与生俱来的才能，费曼在物理系脱颖而出。但是他还有另一种可能更为重要的才能，我不知道是天生的，还是后天培养的——那就是直觉。

物理直觉是一种令人神往却又难以捉摸的技能。我们如何才能预知哪条路能最有效地解决物理学问题？毫无疑问，有些直觉是可以习得的。这就是为什么主修物理的学生被要求解大量的习题。通过这种方式，他们开始获知哪些方法可行，哪些不可行，与此同时这也增进了他们解决问题的具体技能。然而必须承认，有些方面的物理直觉是无法传授的，这些直觉往往在特定的时间和地点才能与特定人的灵魂碰撞。爱因斯坦拥有这样的直觉，从他具有划时代意义的狭义相对论，到他登峰造极的成就——广义相对论的提出，这种直觉伴随了他20多年。然而后来，当他慢慢远离了20世纪量子力学的主流研究前沿时，这种直觉渐渐远离了他。

费曼的直觉在某一方面是很独特的。爱因斯坦提出了关于自然界的全新理论，而费曼则是从全新的角度探索了一些已知的观点，而这些新角度往往伴随或导致了更多的理论成果的产生。费曼理解一种物理思想的唯一方式，就是用他自己的物理语言去推导。但由于他的物理语言通常是自学得来的，他推导的最终结果往往与“传统”的观点大相径庭。我们将在后文中看到，费曼是如何建构他自己的知识体系的。

不过，费曼的直觉也是来之不易的，他的直觉建立在不懈努力的基础之上。早在高中时代，他系统化的学习方法和检验问题时的全面周密就已展露无遗。他在记事本上用表格详细记录了计算正弦值和余弦值的过程。后来在他编写的一本名为《实用微积分》的详尽的学习笔记中，他列出了长长的积分表格，表格中的所有积分也是他亲自计算出来的。在后来的人生中，费曼时而因为给出了对问题的新解法而令人惊叹，时而因为迅速抓住了复杂问题的核心而受到关注。而这些看似超众的才能，实际上是因为他对于一个问题会不知疲倦地思考，会想出一系列不同的解法，而不是止步于一种解法。这样的思考和探索都体现在他为了理解自然世界而记录的数千页的笔记里。正是因为他愿意从每个角度去思考一个问题，并在穷尽一切可能之后才开始仔细整理思路，他才如此与众不同，而这些都源于他深沉的才智和不知疲倦的专注力。

“愿意”一词用在这里或许并不准确，“需要”似乎更为妥当。费曼需要全面理解他遇到的每一个问题，从头开始，用他自己的方式，通过多种方法去解决它。后来，他还试图将这一研究原则教给他的学生。一个学生后来说：“费曼强调创造性，对他而言，创造性就是从头开始解决问题。他敦促我们创造自己的理论体系。这样一来，我们的成果，即便只是指定的课堂习题的答案，也会带有自己的个性特质——就像费曼自己的工作带有他独特的个性印记那样。”

小时候的费曼不仅能够长时间聚精会神，而且已经彰显出控制并组织思维的能力。还记得我自己小时候，我有一套家庭化学实验套装，我常常把各种东西随机组合在一起，观察可能发生的事情。而费曼则如他后来所强调的那样，“从不在与科学有关的事情上胡来”。他总是以一种可控的方式来进行他的科学“游戏”，密切留意事情的进展。在他逝世后，人们通过费曼所做的大量笔记发现，他的确仔细记录了他的每一次科学探索。他甚至一度设想用科学的方法来安排与自己未来妻子的家庭生活，直到一位朋友使他相信，这种想法完全不切实际。最终，费曼放弃了这种认为凡事皆可用物理来安排的天真想法。多年以后，他向一个学生建议道：“人格的培养不能仅仅依靠物理定律，生活的其他方面也得加进来。”任何时候，费曼都喜欢游戏和玩笑，但当触及科学时，他会变得异常严肃，这种状态始于儿时，并贯穿其一生。

费曼也许是在大学第一年接近尾声的时候才做出了转修物理的决定，但当他还在读高中时，一切早有铺垫。事后想来，对费曼投身物理起决定性作用的事件，是他的高中老师巴德先生向他介绍了可观测世界里最微妙却也最精彩的奥秘之一。这一奥秘建立在费曼出生300多年前的一个发现的基础之上，其发现者是律师出身的杰出而孤僻的法国数学家皮埃尔·德·费马（Pierre de Fermat）。

和费曼一样，费马在晚年获得的公众影响力并非因为他最重要的科学成就。1637年，费马在阅读希腊著名数学家丢番图的杰作《算术》时，在书页的空白处草草地写下了几行字，称他已经发现了关于一个非凡数学事实的极简证明。这一非凡事实是：当$n≥2$时，方程$x^n+y^n=z^n$无整数解（当$n=2$时，该方程就是我们熟悉的描述直角三角形三条边关系的毕达哥拉斯定理）。费马是否真的做出了这个证明是值得怀疑的，因为即使到了350余年后，对这一数学事实的证明也几乎需要用到20世纪数学领域的全部积淀以及几百页的演算才能完成。无论如何，如果费马至今仍被公众记得的话，那并不是因为他在几何学、微

积分以及数论等方面的许多重要贡献，而是因为那个写在书页边缘，被人们称为“费马大定理”的永恒猜想。

然而，在做出上述可疑声明的25年后，费马确实对另一条定律给出了完整的证明：这一出色的、几乎超自然的原理对于一些物理现象有着指导意义，而费曼将用它改变我们对现代物理学的认识。费马于1662年关注的这一问题涉及荷兰科学家维勒布罗德·斯涅耳（Willebrord Snell）在40年前所描述的现象。光从一种介质（如空气）传播到另一种介质（如水）中时，它的传播方向会发生改变，这就是折射现象。斯涅耳总结出了折射的数学规律，今天我们称其为“斯涅耳定律”（Snell’s law）。这一定律至今仍是高中物理课上经常出现且需要额外记忆的乏味知识点，然而实际上，它在科学史上有着重要而深远的影响。

斯涅耳定律给出了光线通过两介质间的界面时入射角和折射角的关系。我们这里不关注这个定律准确的数学形式，只关注它的一般性特征以及它的物理根源。简而言之，该定律指出，当光从低密度介质进入高密度介质时，光的轨迹会向与界面垂直的方向弯折（见图1）。

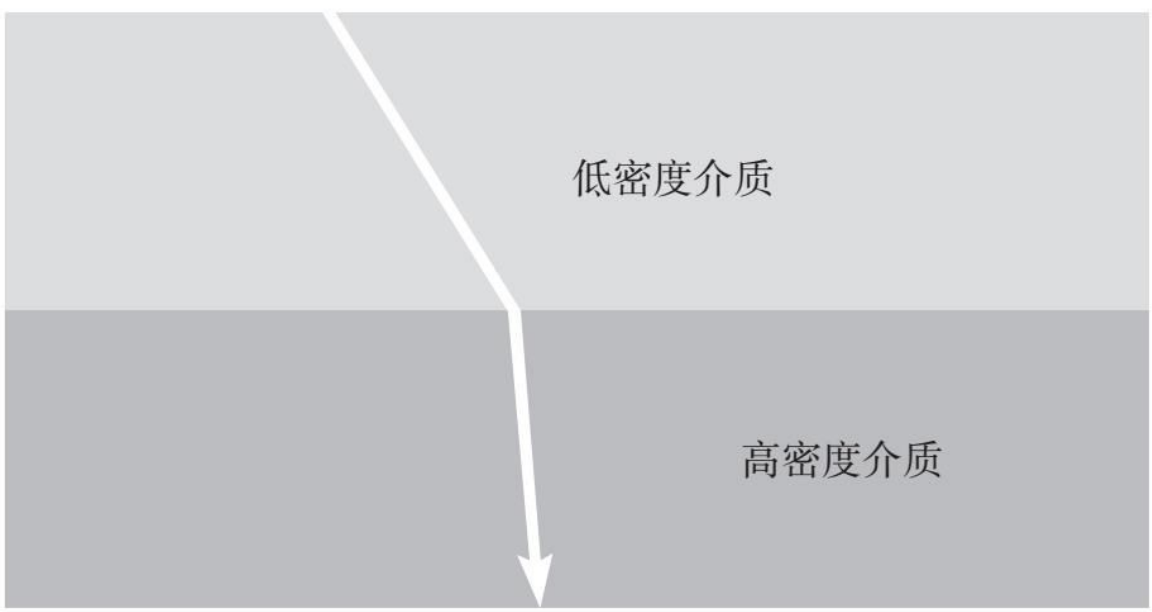


图1 光的折射

现在的问题是，为什么光的传播方向会发生弯折？倘若如牛顿等人所想，光是由粒子流构成的，我们就可以理解为光线的弯折源于粒子从一种介质进入另一种介质时速度的增加，这些粒子由于加速被向前拉扯，从而在跨过界面后更偏向与界面垂直的方向，以便更有效地移动。然而，这一解释在提出时就令人难以置信。毕竟，任何粒子在进入密度更高的介质之后，其运动理应受到更大的阻力，正如行驶在路上的汽车在进入交通拥堵区域会减速行驶一样。

然而，还有另一种可能，是由荷兰科学家克里斯蒂安·惠更斯（Christiaan Huygens）在1690年提出的，即光是一种波而非由粒子构成，正如声波在变慢时会向内弯曲一样，光在密度较高的介质里也会向内弯折。了解物理学史的人都知道，光在进入高密度介质的时候的确会变慢，因此，斯涅耳定律给出了关于光的行为的重要证据，至少在折射中，光更像是波。

早在惠更斯提出这种解释30年前，费马就曾提出，光在高密度介质中的传播速度比其在低密度介质中更慢。然而，数学家费马并没有从光到底是粒子还是波的角度去考虑这个问题，他指出在这种情况下，我们可以从更普遍的数学角度对光的传播轨迹进行解释，这一解释现在被称作“费马最短时间原理”。费马提出，“光在两个给定点之间沿着所需时间最短的路径传播”，这条原理给出的光的弯曲轨迹与斯涅耳定律完全一致。

我们可以尝试着这样去理解：如果光在低密度介质中传播得更快，那么如果想在最短时间内从A到达B（见图2），显然光应该倾向于在低密度介质中传播更长的距离，而在传播速度更慢的高密度介质中行进较短的距离。当然，光也不能在低密度介质中过分地逗留，否则光因多走的距离而浪费的时间将超过因速度优势而节省的时间。可行的传播路径是唯一的，而这条有着弯折轨迹的传播路径刚好与斯涅耳观察到的轨迹重合。

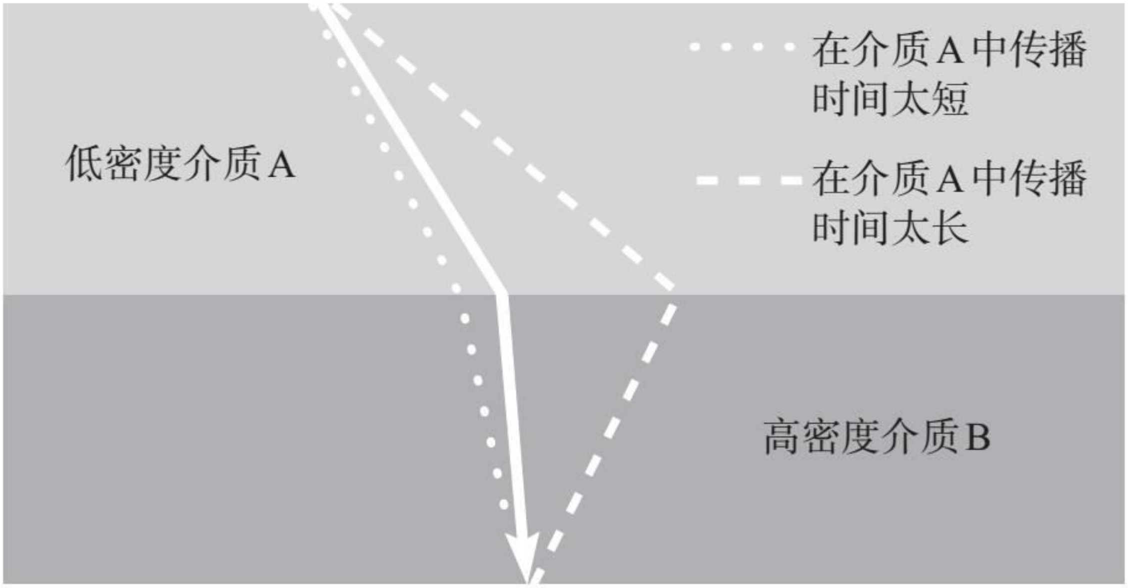


图2 费马最短时间原理

费马最短时间原理是一种用于确定光的传播路径的简洁数学表达，无须诉诸任何基于波或粒子的机械描述。唯一的问题是，当我们思考这一结果的物理原理时，其中似乎暗含着光的某种“意向性”。正如在星期一早高峰时段收听交通台路况报告的通勤者一样，在某种程度上，光在开始传播之前似乎也考虑了各种可能的路径，并最终选取了到达终点最快的那条路。

然而有趣的是，我们无须将这种“意向性”归因于光的传播本身。费马最短时间原理其实是物理学一个更显著性质的绝佳例子，这一性质从核心上指明了一个令人吃惊的先验事实，即自然是可以通过数学去理解的。这一性质对理查德·费曼而言犹如指引其物理研究方法的一盏明灯，对他几乎所有的科学发现都至关重要，他在诺贝尔奖获奖演说中至少两次提及这一物理性质。首先，他描述说：

> 有一件事总是让我感到奇怪：那些基本的物理学定律可能以许多不同的形式被发现，这些形式起初并不完全相同，但是用一些数学技巧将其变换，你就会发现其中的关联……这是我从经验中学到

> 的一些东西。这世上总有其他的方式去描述同样的东西，而这种方式完全不同于你以往的表达……我想这就是自然简单性的某种表现。我不知道自然选择这些古怪的形式来表达基本原理究竟意味着什么，但可能这是一种定义“简单”的方式。如果你能用几种不同的方式将同一件事完整地描述出来，却不能立刻意识到这些描述指的是同一件事，那这件事很可能是很简单的。

随后（这段表述对理解后面的内容更为重要），他又补充道：

> 有些已知的理论可以用不同的物理思想去表述，如果它们做出的科学预测是完全等价的，那么这些表述在科学上就是不可区分的。然而当我们试图以此为基础向未知领域扩展时，在心理上，这些表述之间仍然有别。这是因为根据不同的物理思想，我们在试图理解未知事物时提出的可能修正的类型也不同。

费马最短时间原理正是费曼所说的“物理定律冗余性”的一个显著例子。费曼着迷于这种看起来有些奇怪的冗余性，也着迷于不同表述所带来的不同“心理功用”。从电磁力的角度去思考光经过两相介质交界面时发生的弯折，揭示了与这一弯折相关的介质的某种属性；从光速的角度去考虑同一现象，则揭示了光内禀的波的属性；而从费马原理的角度去考虑这一现象可能不会告诉我们光与特定的力或者波的关系，但这一角度更深刻地揭示了运动的本质。幸运且重要的是，这些不同角度的描述都给出了相同的科学预测。

于是我们可以释然了：光并不知道它走的是最短的路径，而只是刚好按照最短路径行动而已。

然而，在高中时期那个影响了费曼一生的日子里，改变他命运的并不是费马最短时间原理，而是一个更加微妙的物理思想。费曼后来回忆道：“当我在高中的时候，我的物理老师，他叫巴德先生，在课后把我叫了过去，对我说：‘看上去你好像有点儿无聊。我想告诉你一些

有趣的东西。’说完他向我讲述了一些极具吸引力的东西，从那以后，我一直沉迷其中……他告诉我的就是最小作用量原理。”“最小作用量”听起来好像更适用于描述电话公司客服代表的工作，而不是像物理这样的领域，毕竟，这一领域是以描述各种运动为核心的。但最小作用量原理和费马最短时间原理是非常相似的。

费马最短时间原理告诉我们，光总是沿着所需时间最短的路径传播。但是如果我们考虑棒球、炮弹、行星或者回旋镖呢？这些东西的运动规则可未必像光一样简单。那是否有什么物理量，就像费马最短时间原理里的“时间”一样，让它取最小值就能找到受力物体的运动轨迹呢？

让我们思考一下运动中的物体，比如一个正在坠落的砝码。我们说这样的物体有两种能量。一种是动能（kinetic energy），与物体的运动相关（英语中“kinetic”一词来源于希腊语kinesis，指“运动”）。物体运动得越快，它的动能就越大。物体的另一部分能量叫势能（potential energy），其定义和名字一样微妙：它是隐藏起来蓄势待发的，当物体做功时，这部分能量才体现出来。比如，一个从高层建筑物顶部落下的沉重砝码，对于楼底停放车辆的顶部所造成的破坏，要大于相同砝码从距离车顶仅几英寸(注)高的地方落下而带来的损害（做功也更多）。很显然，物体摆放得越高，其做功的能力就越大，具有的势能也就越大。

最小作用量原理阐述的是，先计算在任何时刻路径每一点上物体动能与势能的差值，进而将这一差值沿路径相加，如果某一条路径上这个差值的累积量小于物体沿任何其他可能路径运动所产生的累积量，这条路径就是物体的真实运动路径。换句话说，运动中的物体将会调整自己的运动，以使其动能与势能在平均意义上尽可能相近。

如果这一原理看起来有点儿神秘和抽象，那是因为它确实如此。怎么会有人想出这么一个原理呢？我们该如何将它应用于日常物体的运动呢？

我们得感谢法国著名数学家、物理学家约瑟夫·路易·拉格朗日（Joseph Louis Lagrange），他最具代表性的成就是他在天体力学方面的工作。例如，他确定了一系列特殊的点，在这些点上，由不同行星产生的总引力刚好与来自太阳的引力互相抵消。这些点被称为“拉格朗日点”。目前NASA将大量的人造卫星发射到了这些点上，以使它们在各自的轨道上稳定运行并帮助我们研究宇宙。

然而，拉格朗日对物理学的最大贡献可能在于他重构了运动定律。牛顿定律把物体的运动与物体所受的合力联系了起来。但是拉格朗日试图证明，如果我们引入“作用量”，又称“拉格朗日量”（也就是我们刚刚提到的，把动能与势能之差沿着路径求和），使作用量最小的那条路径就是物体的真实运动路径，而这一推导过程与牛顿定律是等价的。（对作用量）求最小值的过程需要使用微积分（微积分也是由牛顿发明的），其数学描述与牛顿定律完全不同。然而在费曼看来，这两种表述在数学上是等价的，尽管它们在“心理上”迥然有别。

巴德先生向十几岁的费曼讲述的，正是这个有些奇怪的“最小作用量原理”，通常也被叫作拉格朗日原理。大多数青少年可能无法感受到这个原理的迷人之处，甚至会认为它难于理解，但是费曼却被它震撼，至少他后来是这么觉得的。

这一原理将彻底改变费曼未来的人生。然而，当他进入麻省理工学院开始学习更多的物理知识时，年轻的费曼对此显然并无察觉。事实上，费曼在麻省理工学院读本科时最好的朋友特德·韦尔顿（Ted Welton，此人不仅是费曼本科时的好友，而且与费曼一同修了大部分本科甚至研究生阶段的物理课）后来描述说，费曼当时“疯狂地拒绝承认拉格朗日的思想对于物理学发展是有益的。我们其他人都叹服于拉格朗日思想在表达形式上的简洁性、优雅性与实用性，但是迪克[注]坚持认为，真正的物理学在于找到所有的作用力，并且对作用力进行正确的分解”。

自然也像人生一样，充斥着各种诡谲难料的起伏与转折，而最为重要的是，它几乎完全不受个人好恶的影响。尽管费曼年轻时潜心于用其本能的直觉去理解物体的运动，然而后来使他走向辉煌的却是另一条截然不同的道路。那里并没有隐形的手在指引他，相反，是他迫使自己的直觉转向对当时物理学困境的探寻。这一挑战需要他通过日积月累、艰苦耗时的训练来磨砺思维，去解决20世纪最伟大的物理学家们都未能攻破的难题。

在一些重要关头，费曼发现自己又回到了最初激发他学习物理学的最小作用量原理。

---

1. 出自美国传统故事《金发姑娘和三只熊》，金发姑娘来到三只熊的家里，她先后看到了三碗汤，第一碗太烫了，第二碗太凉了，第三碗温度刚刚好。——译者注
2. 1英寸=2.54厘米。——编者注
3. “迪克”（Dick）是费曼的别名。——译者注

第2章

与惠勒的邂逅

> 我总是对物理学忧心忡忡。如果一个想法看起来很糟糕，我会说它看起来很糟糕。如果一个想法看起来还不错，我会说它看起来还不错。
>
> ——理查德·费曼

在麻省理工学院读大二时，费曼有幸邂逅了特德·韦尔顿，他们当时修了同一门理论物理学高级研究生课程，是课堂上仅有的两名二年级本科生。志趣相投的二人，分别从图书馆借出了高等数学的参考书，经过学习上短暂的相互较量，他们最终决定合力“对抗课堂上那群看起来充满敌意的高年级学生和研究生们”。

合作将费曼和韦尔顿两人都推向了新的高度。他们来回传递一本笔记，两人各自往上添加广义相对论以及量子力学的各种问题和解答，而这些内容显然都是他们自学过的。这不仅激励费曼不懈努力，以自己的方式获得所有的物理学知识，同时也给后来的费曼留下了一些深刻的经验教训。尤其值得一提的是，费曼和韦尔顿试图将量子力学的标准方程——薛定谔方程与爱因斯坦的狭义相对论结合起来，以确定氢原子中的电子能级。这样做的结果是，他们重新发现了一个已经广为人知的方程——“克莱因–戈登方程”。不幸的是，费曼在韦尔顿的催促之下，应用这个方程去理解氢原子，然而计算结果与实验结果完全不符。这并不奇怪，因为仅仅10年之前，杰出的理论物理学家保罗·狄拉克（Paul Dirac）已经证明了“克莱因–戈登方程”并不适用于描述相对论电子，狄拉克也因推导出正确的方程而获得了诺贝尔奖。

费曼将这一经历描述为一次令他刻骨铭心、“可怕”却又重要的教训。他从此懂得了不能仅凭某个数学理论的“奇妙形式之美”就过分依赖这一理论，而应认识到检验一个理论的优劣要看它是否能够“与真实情况相符”，即与实验数据相符。

费曼和韦尔顿在物理学习方面并不完全依靠自修，他们也去上课。在大学二年级的第二个学期，他们给理论物理课的任课教授菲利普·莫尔斯（Philip Morse）留下了异常深刻的印象，莫尔斯邀请他们二人连同另外一名学生一起，在大学三年级参加他每周一个下午的私人讨论班，共同学习量子力学。再后来，莫尔斯教授邀请这三名学生开始了一个“真正的研究”项目，在项目中，他们要计算原子的性质，而这些原子远比氢原子要复杂。在参与项目的过程中，他们也学会了如何使用所谓的第一代计算机器，这一技能对费曼后来的研究工作也起到了很重要的作用。

到了本科学习的最后一年，费曼基本上已经掌握了本科和研究生阶段大部分物理课程所涉及的知识内容，他开始憧憬自己未来的科研生涯，因此他决定进入研究生院继续深造。实际上，费曼的进步令人惊叹，在他大三的时候，物理系甚至建议在费曼完成三年学业后就授予他学士学位，而不是通常的四年。然而校方否决了这个建议，于是费曼继续他的研究工作，并在大四这一年在业内颇负盛名的《物理评论》（*Physical Review*）杂志上发表了一篇有关分子的量子力学的论文，还发表了另一篇与宇宙射线有关的论文。他还花了一些时间来加强自己对物理应用的基本兴趣，选修了冶炼和实验方面的课程，这些课程对费曼后来在洛斯阿拉莫斯的工作大有裨益。他甚至设计了一套精巧的装置来测量不同传动轴的速度。

并非每个人都觉得费曼应该在学术道路上继续前行。费曼的父母都没有完成大学教育，他们并不十分理解为什么他们的儿子在完成本科学习之后，还要再学上三四年。1938年秋，理查德的父亲梅尔维尔·费曼来到了麻省理工学院，他拜访了莫尔斯教授，并询问让费曼继续

深造是否值得，费曼是否优秀到了这种地步。莫尔斯教授十分肯定地回答说，费曼是他所接触过的本科生中最聪明的一个，去研究生院继续深造不仅值得，而且如果费曼以后想要继续从事科学事业的话，进一步的学习是必不可少的。费曼的科学人生，就此注定。

费曼的初衷是继续留在麻省理工学院。然而，睿智的物理学教授往往鼓励他们的学生去其他机构继续研究生学习，即使是得意门生。在学术生涯的早期广泛接触多种科研风格和不同的兴趣焦点，对学生而言是非常重要的。因为对很多人来说，将整个学术生涯投身于同一家研究机构，可能会带来一些局限性。正是出于这种考虑，费曼本科毕业论文的指导教师约翰·斯莱特（John Slater）教授强烈建议费曼到别处读研究生，并告诉费曼："世界很大，你应该去见见世面。"

费曼曾在1939年的威廉·洛厄尔·帕特南数学竞赛中拔得头筹，所以他甚至没有申请便获得了哈佛大学研究生院的奖学金。帕特南数学竞赛是面向本科生的最负盛名、标准最高的全国性赛事，1939年举办的是第二届。我还记得在我读本科的时候，数学系最出色的学生会加入所在大学的校队，在赛前进行为期几个月的解题训练。没有人能在竞赛中解出所有的题目，很多时候相当一部分学生一道题都解不出来。麻省理工学院数学系曾在费曼本科学习的最后一年邀请他加入校队参加竞赛。最终费曼的成绩遥遥领先于国内其他参赛者，悬殊的分差显然令阅卷人感到震惊，费曼因此获得了哈佛大学奖学金。费曼后来在提及物理时，有时会假装对形式数学一无所知，但是他的帕特南竞赛成绩充分证明，他也可以与世界一流的数学家们一较高下。

然而费曼拒绝了哈佛大学的邀约，他决定去普林斯顿大学。我猜费曼的这一选择出于和许多年轻物理学家同样的原因：爱因斯坦就在普林斯顿！普林斯顿大学邀请费曼入学，并向他提供了给未来的诺贝尔奖得主尤金·维格纳（Eugene Wigner）做研究助理的职位。但费曼后来被指派给了年轻的助理教授约翰·阿奇博尔德·惠勒（John Archibald

Wheeler）。这对费曼而言是一种幸运，因为惠勒的想象力恰与费曼的数学天资相得益彰。

在一次追念费曼的活动中，惠勒回忆起了1939年春季普林斯顿研究生招生委员会成员间的一次讨论。当时，一名委员盛赞费曼，称没有任何其他入学申请者的数学和物理成绩可与之匹敌（费曼的物理学获得了满分）。与此同时，另一名委员却抱怨，普林斯顿历史上从未招收过历史和文学成绩像费曼一样糟糕的学生。最终，盛赞其物理与数学才能的声音占了上风，后来的科学界应为此感到庆幸。

有趣的是，惠勒并没有提到另一个关键性问题，或许是他没有注意到，即所谓的“犹太人问题”。普林斯顿物理系主任曾致信莫尔斯教授，询问费曼的宗教信仰和倾向，并补充道：“我们并非明文反对犹太教，但我们不得不将系里犹太教徒的比例控制在有限的范围内，因为犹太教徒的很多习俗不好处理。”莫尔斯教授回复说，费曼没有典型的犹太人“气质”，校方这才最终同意让费曼入学。事实上，费曼和许多科学家一样，对宗教基本不感兴趣，而这一点在上述书信往来中并未被提及。

然而，比所有这些外部因素更为重要的是，费曼进入了一个新的阶段，他可以开始思考那些真正令人兴奋的东西了，即那些让人搞不懂的物理学现象。科学，尤其是前沿科学，往往徘徊在似是而非与自相矛盾的边缘。伟大的物理学家则像猎犬一样聚焦在这种矛盾体上，因为他们知道真正的猎物就在那里。

费曼后来说，他在本科阶段“爱上”的那个问题，是近一个世纪以来理论物理学家所共同关注的中心议题：经典电磁学理论。如同很多深邃的问题一样，经典电磁学理论有着简单的表述：同性电荷相斥，只有靠外力做功才能将它们拉近；它们彼此靠得越近，需要做的功就越多。现在让我们想象一个单电子，把它想象成一个有一定半径的带电小球。构造电子时，将所有电荷都拉到这个小球的球面上是需要做

功的。能量随着做功而累积，最终把电荷都拉到小球上而造成的能量累积值，通常被称作电子的自能（self-energy）。

问题在于，如果我们把电子的尺寸缩小，直至缩成一个点，此时电子的自能将趋于无穷大，这是因为将各部分电荷拉到一个几何上无穷小的点所需要的能量是无穷大的。这一问题由来已久，人们提出了各种理论方案来解决这一问题，然而最简单的解释方案是假设电子并不是被压缩在一个无穷小的点上，而是具有一定的尺寸。

然而到了20世纪初，对这一问题的研究有了不同的视角。随着量子力学的发展，电子、电场和磁场的物理图景发生了彻底的改变。例如，量子理论中的波粒二象性认为光和物质（这里指电子）有时表现得像粒子，而有时表现得像波。随着我们对量子世界理解的不断加深，量子世界也变得越发离奇，经典物理学中的一些重要难题却日渐明朗。与此同时，一些问题的答案依旧扑朔迷离，电子的自能就是其中之一。为了说明这一点，我们需要探讨一下量子世界。

量子力学有两个核心特征，这两个特征完全违背了我们对世界的所有一般认知。第一，具有量子力学行为的物体从本质上说都有“七十二变”。这些物体在某一特定时刻可以同时处于不同的状态。这可以指在不同的地方，也可以指做不同的运动，或者既在不同的地方也在做不同的运动。比如，假设电子像一个旋转的陀螺，一个电子可以同时沿着许多不同的方向旋转。

如果一个电子正在绕着垂直于地面的轴逆时针旋转，我们说该电子自旋向上；如果它顺时针旋转，我们说它自旋向下。在任意时刻，一个孤立电子自旋向上的概率是50%，自旋向下的概率也是50%。如果电子的行为类似于我们以传统的直觉所进行的预测，这就意味着我们测量的每个电子要么自旋向上，要么自旋向下，也就是50%的电子处于一种状态，而其余50%的电子处于另一种状态。

从某种意义上讲，情况的确如此。如果我们以这种方法测量电子，我们会发现50%的电子自旋向上，而另一半则自旋向下。然而，

很重要的一点在于，在测量之前假定每个电子要么处于这种状态、要么处于那种状态的做法是不正确的。根据量子力学的表述，每个电子在测量之前都处于一种“自旋向上和自旋向下的叠加态”。简而言之，电子同时处于两种自旋状态！

我们怎么知道电子处于两态之一的想法是“不正确”的呢？事实证明，我们可以进行实验，实验结果取决于未被测量时的电子状态。如果电子的行为对测量十分敏感，也就是说，测量改变了电子所处的状态，那么我们会得到不同的实验结果。

这类实验中最著名的一个采用了向带有两条狭缝的墙壁发射电子的办法。墙壁后面是一个闪烁屏，像老式真空管电视机的屏幕一样，当有电子撞击闪烁屏时，被撞击处就会闪亮起来。如果在电子离开电子源到它们撞上闪烁屏的这段时间内，我们不进行任何测量，我们也就无法分辨出每个电子经过了哪条缝隙，我们只会在后面的闪烁屏上看到明暗相间的条纹图案——与光或声波通过双缝装置后形成的那种“干涉图案”一样。说得更形象点儿，这种图案类似于两股水流交汇时所产生的起伏与平静相间的图案。令人吃惊的是，在任何时候，即使我们每次只向双缝发射一个电子，这种图案仍会出现。因此，这一图案说明从某种程度上说，电子会同时穿过双缝，然后与自己发生“干涉”！

乍看之下，这好像说明不了什么，于是我们略微对实验进行了一点点改动。我们在每条狭缝中各安装了一个不会影响电子束的电子探测器，再向双缝发射电子。现在我们发现，任何时候，当一个电子通过狭缝的时候，有且仅有一个电子探测器会发出信号。这样我们就可以确定，每个电子实际上经过且只经过了一条确定的狭缝，更重要的是我们可以确定是哪一条狭缝。

至此一切顺利，然而接下来由量子力学产生的麻烦来了。在对实验进行了上述看似无妨的修改之后，如果我们检查闪烁屏上的图案，我们会发现此时的图案完全不同于安装探测器之前的图案。此时的图

案更像是我们用枪向双缝墙后的屏幕上射击子弹所留下的图案，换句话说，闪烁屏上对应于狭缝的位置上会留下两个亮点，其他区域则是漆黑一片。

所以，无论你喜欢与否，电子与其他量子物体的行为对于经典物理学而言如同戏法：它们可以同时处在不同的状态，只要我们在过程中不去观察它们。

处于量子力学核心地位的另一基本性质与所谓的海森堡不确定性原理有关。这个原理指出，有一些物理量的组合，比如粒子的位置及其动量（即速度），无法同时被准确测量。无论我们的显微镜或其他测量装置多么精良，位置的不确定性与动量的不确定性之积永远不为零，这个乘积永远大于某一数值，即普朗克常数。这个常数也决定了原子能级之差的大小。换句话说，如果我们非常准确地测量了位置，使得位置的不确定性非常小，这就意味着我们关于粒子的动量或者说速度的信息将很不准确。这样一来，位置的不确定性与动量的不确定性之积才能大于普朗克常数。

此外还有其他的“海森堡对”，比如能量与时间。如果我们在很短的时间内测量一个粒子或者原子的量子力学状态，那么对该粒子或原子的能量测量就会产生很大的不确定性。为了准确地测量能量，我们必须在比较长的时间尺度上进行测量，而在这种情况下，我们就不能确定我们是在哪一特定时刻进行的测量。

假设事情还不够糟糕的话，我们还可以把爱因斯坦的狭义相对论也加进来，这样量子世界就会变得更加古怪，从一定程度上讲，这是因为相对论把质量和能量等同了起来。如果我们有足够的能量，我们甚至能凭空创造出有质量的东西！

那么，如果我们把上述这些结合在一起——量子叠加态、海森堡不确定性原理、相对论，我们得到了什么呢？我们得到了一个比经典理论更为复杂混乱的电子图像，而经典理论中电子的无限自能问题已经足够让人疑惑不解了。

让我来举个例子，当我们试图描绘一个电子的时候，它甚至不一定得是一个电子！为了理解这一点，让我们回到经典电磁学理论中来。这个理论的一个中心观点是，如果我们晃动一个电子，这个电子就会发射电磁辐射，比如光或者无线电波。这一惊人的现象是19世纪由迈克尔·法拉第（Michael Faraday）、汉斯·克里斯蒂安·奥斯特（Hans Christian Oersted）等人在实验中发现的。而詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）则用划时代的理论总结了这一系列现象。电磁现象应该能被量子力学的框架描述出来，因为如果量子力学能够恰当地描述世界，它的预测应该能够与这一实验观察吻合。但是，量子力学的一个重要的新特性在于，它要求我们将辐射看成是由一个个量子，即被称为“光子”的能量包组成的。

现在让我们回到电子。海森堡不确定性原理告诉我们，如果我们对电子进行有限时间的测量，那么我们对其能量信息的了解就具有一定的不确定性。但是如果存在不确定性，我们怎么知道我们测量的仅仅是电子的能量呢？举例来说，如果电子释放了一个携带了很少能量的光子，那么尽管幅度很小，但体系的总能量会发生变化。但是如果我不知道体系的确切能量，我们就不能确定它是否释放过一个携带很少能量的光子。于是我们测量的极有可能是电子的能量加上它释放的光子的能量。

但情况不止于此。如果电子释放了无穷多个携带着极小能量的光子呢？如果我们长期观察电子，我们就能非常准确地测量它的能量，同时在附近放置一个光子计数器来观察是否有光子被释放出来。那在我们观察期间，所有这些与电子一起运动的光子会发生什么呢？答案很简单，电子可以在我们测量光子之前把所有光子吸收掉！

这种电子可以在极短时间内释放并重新吸收光子，以至于我们无法直接测量，这种光子被称为“虚粒子”。稍后我会谈到，费曼意识到当我们同时考虑相对论和量子力学的影响时，不可避免地会出现这些

粒子。因此，现在当我们想象一个移动中的电子时，我们必须把它想成一个非常复杂的，被虚粒子环抱的物体。

在电磁学的量子理论里，虚粒子还发挥着另一个重要作用。它改变了我们对于电场和磁场，以及粒子间相互作用力的认识。一个很好的例子就是一个电子释放了一个光子，这个光子于是能与另一粒子相互作用，被另一粒子吸收。根据光子携带的能量，在这一过程中将发生能量和动量从一个电子向另一粒子的转移。但这正是我们通常所讲的两个带电粒子间电磁力的体现。

事实上，稍后我们将会看到，在量子世界里，电力和磁力都可以被看作虚粒子交换的结果。光子没有静止质量，因此一个被释放出来的光子可以携带任意大小的能量，没有最低限额。这样，正如海森堡不确定性原理所指出的那样，这个光子在被电子重新吸收，以将其能量还给电子之前，可以在粒子间移动任意长的距离（消耗任意长的时间）。正是这一原因使得粒子间的电磁力可以跨越很长的距离发挥作用。如果光子的质量不为零，那么它将带走的最低能量是$E=mc^2$，其中m是光子的质量，若要使量子不确定性能够掩盖这一违反能量守恒的情况，光子必须在特定的时间（即特定的距离）内被原来的电子或另一个电子重新吸收。

我们讨论得有点儿远了，至少超越了当时的费曼所掌握的知识。然而，我是有意引入这些复杂的东西的。因为对于一般人，尤其是第二次世界大战之前的人们而言，这一物理图景看起来就是如此复杂且难以描绘的。这就是费曼在学生时代所进入的基本物理学领域，奇怪的新规则让人无法理解。举例来说，经典理论里的无穷大的电子自能问题在量子理论里依然存在，这显然是由于电子可以释放并重吸收任意高能量的光子，只要过程对应的时间足够短。

但是这样引起的困惑甚至更加糟糕。量子理论在总体上与实验结果非常吻合。但是当物理学家试图将精确计算出的预测值与准确的实验结果进行比较时，如果他们在计算中引入了不止一个光子，而且引

入了粒子间的多光子交换（这种多光子交换过程的发生概率远远低于单光子过程），那么他们就会发现这一多光子“高阶”效应的额外贡献是无穷大的。更可怕的是，利用量子理论计算这些无穷项既艰难又乏味，即使当时最聪明的头脑也需耗时数月才能完成其中的一项计算。

当费曼还是本科生的时候，他产生了一个想法，并带着它进入了研究生院：如果经典电磁学的“图景”（如前所述）是错的，那会怎样？如果有一条新的规则规定带电粒子不能与自身相互作用，会导致什么结果？如果这条新规则真的成立，会导致那个无穷大的电子自能消失，因为电子不能与其自身的电场相互作用。需要强调的是，即使不考虑量子效应，电子自能的无穷大问题，在纯粹的经典理论里已经存在了。

但是费曼更加大胆。他假想，如果我们所说的由粒子间虚光子的交换而引起的电磁场从根本上就不存在，将会怎样？也许整个电磁效应都是由带电粒子间直接的相互作用引起的，根本不需要场的存在呢？在经典理论里，电场和磁场完全是由带电粒子的运动造成的，所以费曼觉得场本身也是冗余的。换句话说，一旦确定了粒子的初始电荷和运动状态，从原理上讲，粒子随后的运动完全可以简单地通过考虑电荷间的直接相互作用来确定。

此外，费曼认为，如果我们放弃经典理论里的电磁场，或许也有利于解决量子理论中的问题。因为，如果我们能够摒弃在量子理论计算中那些无穷无尽的光子，而仅仅处理带电粒子，我们或许就能得到合理的答案。正如他在诺贝尔奖致辞中所言：“在我看来，粒子与它自己相互作用这一想法，显然并非科学上的必然。实际上，这种想法有点儿愚蠢。所以我暗自设想，电子不能与它自己相互作用，它们只能与其他电子相互作用。这意味着根本就没有‘场’的存在。电荷间的相互作用是直接的，虽然可能会有一定的延迟。”

这些想法十分大胆。费曼将这些想法带到了普林斯顿研究生院，并告诉了约翰·阿奇博尔德·惠勒。而惠勒正是可以与费曼交换思想的绝

佳人选。我所了解的约翰·惠勒是一个最和善、最亲切的人，温文尔雅，体贴至极，看起来像一个完美的南方绅士（尽管他来自俄亥俄州）。然而，当他开始谈论物理时，他会突然变得大胆而无畏。用当时他的一位普林斯顿同事的话说："在惠勒谦逊礼貌的外表之下，隐藏着一颗林中之虎一般的心……他勇于去触碰任何疯狂棘手的物理问题。"惠勒的这种无畏与费曼睿智的思想珠联璧合。费曼在给一位年轻物理同行的信中曾经写道："去他的鱼雷，全速前进。"有一次我引用了这句话，并引来了阵阵笑声。费曼当然是在模仿戴维·法拉格特（David Farragut）（注）上将的口吻，但他并不是在跟对方探讨莫比尔湾战役，而是鼓励对方顺应才能、一往无前。这句话同样也适用于费曼和惠勒。

惠勒与费曼是一对完美的搭档。在接下来的三年里，这对在思想上彼此共鸣的师生在普林斯顿展开了密切的学术交流——真正的物理研究理当如此。他们都不会立刻去质疑对方的疯狂想法。惠勒后来写道："我永远感激命运让我们彼此相遇，让我们享受了更多共同进取的乐趣……讨论变成了欢娱，欢娱变成了笑话，笑话又变成循环往复的交流，以及更多的思想……通过我的多门课程，费曼了解了我的信念，即那些重要的东西在本质上都是简单至极的。"

当费曼第一次向惠勒描述他的疯狂想法时，他并没有遭到惠勒的嘲笑。相反，惠勒立即指出了想法中的缺陷，并援引了"机遇眷顾有准备的人"这句格言，因为惠勒也一直在探索类似的问题。

费曼此前也已发现了自己想法中的一处明显错误。众所周知，加速一个带电粒子需要做的功比加速一个电中性的粒子更多，因为在加速过程中，带电粒子会释放辐射并消耗能量。因此，带电粒子会产生一个额外的阻力（即辐射阻力），以避免自己被推开。费曼曾希望通过考虑粒子受到的反馈作用，以某种方法解决这个问题。这里的反馈不是来自粒子自身，而是来自环境中其他电荷产生的诱导运动。这些电荷的运动受到它们与该粒子间相互作用的影响。也就是说，第一个

粒子对其他粒子的作用力将使它们运动，而后者的运动将产生电流，并反作用于第一个粒子。

当惠勒第一次听到这些想法时，他指出如果事实真如费曼所想，那么第一个粒子产生的辐射阻力将取决于其他电荷的位置。然而事实并不是这样的，而且这将导致辐射阻力的延迟，因为任何信号的传播速度都无法超过光速。所以，第一个粒子与相隔一定距离的第二个粒子相互作用将花费一定的时间；而随后第二个粒子与第一个粒子相互作用需要花费更多的时间，导致在时间上第二个粒子相对于第一个粒子的初始运动显著延迟。

但随后惠勒提出了一个更加疯狂的想法：如果其他电荷的反作用是“时间反向”的呢？这样，其他粒子对第一个粒子的反作用并不滞后于第一个粒子开始运动的时刻，而可能会发生在第一个粒子开始运动的同时！至此，一个有着正常直觉的物理新人也许会说：“等等，这不是有点儿太离谱了吗？如果粒子能即刻产生反作用，这是否违反了因果律（原因发生在结果之前）等物理学铁律？”

尽管这种“时间反向”的反作用思想开启了一种理论上的可能性，但要证明这种思想是否会带来问题，物理学家必须首先进行非常精确的计算。而这正是费曼和惠勒所做的。他们进行了各种尝试，来检验他们是否可以在不引入新问题的前提下解决已有问题。他们甘愿暂时放下对大胆设想的怀疑，除非计算结果迫使他们疑窦再生。

基于惠勒先前对这些问题的思考，他们几乎立刻得到了一些结果：在这种情况下，辐射作用可以与其他电荷的位置无关；同时，这种作用原则上是即刻发生的，而不是在一段时间之后，即没有延迟。

惠勒的设想有它自身的问题，但它让费曼开始思考，并且进行了计算。费曼仔细研究了各种细节，精准确定了粒子间需要多少“时间反向”的作用才能使一切合理。除此之外，他又按典型的费曼风格测试了许多不同的情况，以确保这个想法不会产生没有考虑到的疯狂的现象，确保不会违背常理。他甚至鼓励朋友们去寻找可以难倒他的反

例。费曼证明，只要在宇宙中的所有方向上都有100%的概率最终会发生带电粒子与原始粒子的反向作用，人们就永远不能用这些疯狂的即时相互作用来制造一台可以在按下“开始”按钮之前就运行的机器，即使类似的机器也不行。

用汉弗莱·鲍嘉（Humphrey Bogart）的话说，这开启了一段美好的友谊[注]。费曼拥有出众的数学才华和良好的物理直觉，而惠勒则有着丰富的经验和敏锐的洞察力。惠勒能够快速指出费曼的错误，并提出改进意见；同时，惠勒有着开明的头脑，他鼓励费曼去探索，去积累足可与其才能相衬的计算经验。一旦费曼将这二者结合起来，他几乎势不可当。

---

1. 戴维·法拉格特是美国南北战争期间的海军舰队司令，他因在莫比尔湾战役中的那句命令“去他的鱼雷，全速前进”（Damn the torpedoes. Full speed ahead.）而被人们铭记。——译者注

2. 汉弗莱·鲍嘉是出生于纽约的美国男演员，“这是一段美好友谊的开始”是他在电影《卡萨布兰卡》中所出演角色的经典台词。——译者注

第3章

严肃地玩乐

> 一个乍看之下完全荒谬的想法，如果经得起各种实验的检验以及仔细的推敲，那么这个想法或许实际上并不荒谬。
>
> ——理查德·费曼

尽管理查德本科时的任课教授们已经对他的才华做出了认证，但这仍然不足以驱散梅尔维尔·费曼对儿子未来的担心。理查德在研究生院开始与约翰·阿奇博尔德·惠勒共同工作之后，梅尔维尔长途跋涉到普林斯顿大学，想要再次确认理查德的学习进展和他的学术前景。而这一次，梅尔维尔从惠勒那里得到了同样的答复：费曼的前途将是光明的，并且完全不会受到他所说的“平凡的出身”或者社会上的“反犹太偏见”的影响。惠勒或许是在粉饰现实，或者仅仅表达了他自己的美好愿望。学生时代，惠勒曾经是基督教和犹太教青年联合会的发起者和领导人。

然而，纵使反犹主义的阴影在学术圈里挥散不去，也不足以阻挡费曼前进的步伐。费曼太优秀了，而且徜徉在科学的海洋里给了他无尽的乐趣。只有傻瓜才会注意不到他的才华和潜力。在费曼的一生中，他对于物理的痴迷，以及解决他人未解之难题的能力，延伸到物理学各个领域，从晦涩难懂的分支到那些貌似普通的问题。

费曼的顽皮之举随处可见。惠勒的孩子们一直都很喜欢费曼来他们家做客，因为这位客人常常用各种花样逗他们发笑。惠勒记得有一天下午，费曼向他要了一个锡铁盒罐头，并对孩子们说他不打开罐子，也不用看标签，就能知道里面装的是固体还是液体。“怎么做

呢？”孩子们异口同声地问。“通过我把罐子抛向空中后罐子的翻转方式。”费曼回答道。果然，他做到了。

费曼对世界孩童般的兴奋使他一直很有孩子缘。物理学家弗里曼·戴森（Freeman Dyson）在1947年的一封信中提到了这一点。戴森在康奈尔大学读研究生时，费曼是康奈尔大学的助理教授。戴森在信中描述了在物理学家汉斯·贝特（Hans Bethe）家参加为一位贵宾而举办的聚会的情形。他记得，贝特5岁的儿子亨利一直抱怨没有看到费曼。小亨利说：“我要迪克，你说过迪克会来的。”最终，费曼来了，冲到楼上与亨利大声地玩耍起来，而聚会中的人们都停止了交谈，倾听着楼上的声音。

费曼一边逗惠勒的孩子，一边与惠勒在一整年的共同工作中愉快相处，努力探索他们的奇思异想。他们试图通过考虑发生在带电粒子与无穷宇宙中的外部吸收物质之间的、奇特的“时间反向”的相互作用，来解决经典电磁学理论中带电粒子无穷大的自能问题。

费曼继续这项研究的目的很简单。他想要解决经典电磁学中的一个数学问题，并希望最终借此说明出现在量子理论里的更重要的问题。而除此之外，惠勒想要发展一个更为疯狂的想法，来解释在宇宙射线中发现的新粒子，并最终借此解释在核物理实验中发现的新粒子：也许所有的基本粒子都是由电子的不同组合构成的，基本粒子内部这些电子间的相互作用与基本粒子外部电子间的相互作用不同。这个想法是疯狂的，但是至少它可以帮助惠勒保持自己对他和费曼所进行的研究的热情。

费曼对理论物理工作中不可避免的挫折以及各种绊脚石持有一种玩乐的态度。我们可以从他早年写给母亲的一封信中读出这种态度。彼时他刚刚进入研究生院不久，他与惠勒的合作尚未朝着重新审视电磁学理论的方向发展：

> 上周的进展极其迅速、顺利，但是现在我遇到了一些数学上的困难，我要么克服它，要么绕过它，或者干脆换一条思路。我所有的时间都花在了这个问题上。不过我喜欢忙碌，并且真的乐在其中。我对问题的思考从未如此持久和深入。但这也意味着，如果我仍不知所措，我将会非常烦闷。然而我对问题的理解和探索已经有了一定的深度，惠勒教授对此也很满意。可即便如此，这个问题也尚未完成，不过我刚刚发现我最终能到达哪里，以及我们将如何到达（尽管之前提到的数学上的困难已经摆在眼前）。这真是一种乐趣！

费曼把攻克数学难题也视为“乐趣”，这可能正是他区别于其他人的品质之一。

从1940年秋季到1941年年初，在费曼与惠勒就他们在电磁学方面的新想法进行了为期数月的紧密交流之后，惠勒终于给了费曼一个展示这些想法的机会，不是面向研究生，而是在普林斯顿大学物理系的讨论会上呈现给专业物理学家。不过，这些人并非普通的物理系同事，这场会议的组织者是后来的诺贝尔奖获得者尤金·维格纳，一些特殊人物也得到了邀请，其中包括著名数学家约翰·冯·诺伊曼（John von Neumann），以及从苏黎世大学来此访学的令人敬畏的诺贝尔奖获得者、量子力学的发展人之一沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）。还有一位不是别人，正是阿尔伯特·爱因斯坦，他此前就表示有兴趣参加这次讨论会（可能是受到了惠勒的鼓动）。

我曾试着想象自己身处费曼当时的情境，想象作为一名研究生给如此一群人做报告是怎样的感受。即使不考虑他们显赫的学术地位，这一群人本身也是很难被取悦的。比如泡利，他是出了名的一言不合就会站起来从演讲者手中夺走粉笔的人。

不管怎样，费曼为这次报告做好了准备。当他开始演讲的时候，他的头脑中就只剩下物理本身，紧张的情绪烟消云散。不出所料，泡利提出了反对意见，他担心费曼所讲的“时间反向”作用，可能仅仅是

从正确答案出发而进行的反向数学推导，而实际上并没有得出任何新的结论。同时，泡利对费曼思想中的“远程作用”也有所担忧。泡利询问爱因斯坦：如果人们摒弃了“场”这一用来传输力和信息的概念，是否会与他在广义相对论上的工作相抵触？有趣的是，爱因斯坦谦逊地回答说，可能会有矛盾的地方，但毕竟他自己的引力理论（物理学界将此理论视为自牛顿以来最重要的一项成就）“还不是很成熟”。惠勒后来回忆称，当他和费曼到爱因斯坦在默瑟街的家中拜访并继续讨论这一问题的时候，爱因斯坦实际上对使用“时间反向”和“时间正向”的解决方案是同等赞同的。

问题在于，每一天从睁开眼睛的那一刻起，我们就能感受到物理世界最明显的特征之一，即未来不同于过去。这不仅适用于人类的经验，也适用于无生命物体的行为。当我们把牛奶倒入咖啡时，牛奶起初呈（纯牛奶的）小液珠状；而经过搅拌后，牛奶就和咖啡充分混合在一起，再也不会重新凝结成牛奶小液珠。由此而来的问题是：在自然界中，这一显而易见的时间上的不可逆性，究竟是起因于微观过程的不对称性，还是仅仅适用于我们所处的宏观世界？

与费曼和惠勒一样，爱因斯坦相信微观世界的物理方程应该与时间的指向无关。换句话说，宏观世界中现象显而易见的不可逆性，是因为对于大量的粒子来说，某些特定的状态在自然界出现的概率远大于其他一些状态。就费曼和惠勒的想法而言，正如费曼向他的研究生同学所展示的那样，尽管存在费曼和惠勒所提出的奇怪的“时间反向”作用，但大尺寸物体的物理规律是比较接近人类日常感觉的，也就是说，未来与过去是不同的。这恰恰是因为，广袤宇宙中可能存在的无数的其他粒子与被研究粒子发生相互作用，这种概率现象引起了我们在周围世界中惯见的宏观不可逆性。

后来，在1965年，物理学家们惊讶地发现，某些基本粒子的微观过程确实与时间指向相关，也就是说，一个过程的速度与在时间轴上反向进行的同一过程的速度略有不同。这一结果令人惊异，几位相关

的实验物理学家因此获得了诺贝尔奖。然而，尽管这一效应在理解我们所处宇宙的某些特征方面或许发挥了重要的作用（这其中可能包括我们为何存在于物质而不是反物质世界中），但是传统观点仍然认为，宏观的时间指向与无序度增加的趋势息息相关，这并不是由微观物理造成的，而是宏观概率的结果，正如爱因斯坦、费曼和惠勒所认为的那样。

最终，费曼与惠勒这场“狂飙突进”的理论构想和思想阐发还是偏离了正确的道路。他们提出的理论观点基本上是错误的，因为他们的构想终归与现实不符。电子的确有自相互作用，而电磁场（包括那些涉及虚粒子的电磁场）也是真实存在的。10年后，费曼在写给惠勒的信中总结道：“我觉得我们在1941年的猜想是错误的，你觉得呢？”我们没有找到惠勒的回信，但截至费曼写信之时，他们的错误是毋庸置疑的。

那么，所有这些工作的意义何在？在科学上，每一个重要的新思想几乎都是错误的，要么是细微错误（比如数学上的错误），要么是更严重的错误（比如想法很巧妙，但与自然规律背道而驰）。如果所有科学思想刚被提出时就完全正确，推进科学前沿将会易如反掌。

有鉴于此，科学家们就有了两个选择。他们要么选择去跟进那些已经被研究得较为透彻的领域，并将坚实的结果再向前推进一点点，从而保证有较大的概率成功，要么选择涉足新的有风险的领域，但这样做是没有保障的，他们必须为失败做好准备。这看起来或许令人沮丧，但是在探索绝路与暗巷的过程中，科学家们逐渐积累了经验，建立了直觉，并摸索出一些有用的方法和技术。除此之外，由那些（对初始问题而言）毫无意义的构想所带来的突如其来的想法，有时可能将科学家引上出乎意料的方向，而这一方向有时可能是通往进步的关键。有时候，在某一科学领域完全行不通的一些想法，最终可能成为另一领域的破冰利器。我们将会看到，理查德·费曼在电动力学荒原上长途跋涉的过程中也伴随着类似的事情。

*

在这段时期，费曼的聪明才智有如泉涌，与此同时，他的个人生活也发生了深刻的变化。当费曼还年轻，几乎可以说还是个孩子的时候，他便邂逅了一个让他欣赏、仰慕并渴望的女孩，她身上拥有他所不具备的特质——艺术和音乐的天赋，以及伴随而来的社交自信与优雅风度。这个女孩就是阿琳·戈林鲍姆（Arline Greenbaum），早在高中时代便出现在费曼的生活中。15岁的费曼是在一次聚会上与年仅13岁的阿琳相识的。当时的阿琳一定具备着费曼所渴求的一切特质，她精通钢琴、舞蹈和绘画。费曼在麻省理工学院求学时，她已经成了费曼家的常客。她在费曼家衣柜的门上画鹦鹉，给费曼的妹妹琼（Joan）上钢琴课，课后还陪着琼散步。

我们永远不会知道，这些善意之举是否是阿琳博取理查德欢心的手段，但她显然已视他为心中所属，而这个男人也为她神魂颠倒。琼后来提到，在费曼17岁进入麻省理工学院的时候，全家人都知道，有朝一日费曼会和阿琳结婚。他们的判断是正确的。费曼初入大学的时候，阿琳就经常在周末去波士顿的大学生联谊会看望费曼。在费曼大学三年级的时候，他向阿琳求了婚，阿琳同意了。

理查德和阿琳是彼此的灵魂伴侣。然而他们并非彼此的翻版，而是一种共生的互补，彼此完善。阿琳崇拜理查德突出的科学才华，而理查德显然也很赞赏阿琳喜欢并理解他几乎无法领会的事物的能力。但最重要的是，他们都热爱生活并具有冒险精神。

我之所以要在这本科学传记中提及阿琳，不仅因为她是费曼的初恋——也许还是一生至爱，还因为她的精神支持在费曼不断前行、独辟蹊径以及打破传统的过程中不可或缺，在科学研究方面如此，在生活的其他方面也是如此。

从费曼求婚到阿琳最终因肺结核过世的5年时间里，他们之间的通信感人至深。字里行间充满了天真的期许，以及对彼此的爱慕与尊

重。这些信体现了这对年轻人排除万难、以自己的方式度过一生的决心。

1941年6月，距离他们的婚礼还有一年的时候，费曼在研究生院的学习如鱼得水。阿琳写信给费曼，讲述自己就医之事（他们在最终确定阿琳的病情之前，曾经历了多次误诊），但这封信的重心仍然是费曼，而不是她自己：

> 理查德亲爱的，我爱你……我们在人生的棋局里还有更多的东西要学——我不想让你为我做任何牺牲……我知道你此时正在非常努力地工作以便把文章写出来——并且同时进行其他工作——你终于要发表些东西了，我发自内心地为你感到高兴——你的工作得到了认可，这让我尤其激动——我希望你继续工作，为科学界乃至整个世界倾尽所能……如果你受到批评——请记得，人各有所爱。

阿琳比其他任何人都更了解理查德·费曼。她既能适时地让费曼感到难堪，也能够激励费曼坚守自己的信念，特别是鼓励他诚实以及做出自己的选择，这是最重要的。费曼的著名自传题为《你干吗在乎别人怎么想？》（*What Do You Care What Other People Think?*），这正是阿琳在费曼犹豫不决、惊慌失措时经常重复的一句话。比如有一次，她寄给费曼一盒铅笔，每支铅笔上都刻有"亲爱的理查德，我爱你！——小猫咪"（"小猫咪"是费曼对阿琳的爱称）的字样。她发现费曼为了避免在工作中被惠勒发现而擦掉了这些字时，便对他说了这句话。如果说费曼有勇气坚守自己的信念，并最终有勇气走一条属于自己的道路（无论在才智上或者生活的其他方面），那么这种勇气在相当大程度上都是来自阿琳对他的影响。

当梅尔维尔·费曼为儿子的未来职业而忧心之时，理查德的母亲露希尔则为理查德的个人生活而操碎了心。她的确很喜欢阿琳，但是在费曼研究生阶段后期，露希尔就像其他很多犹太母亲一样写信给理查德，袒露了自己在阿琳是否会拖累他工作、束缚他求职以及给他带来

经济压力等问题上的焦虑。阿琳的病症需要特殊的照顾，需要充足的时间和金钱，露希尔担心所有这些条件理查德都不具备。

1942年6月，在理查德获得博士学位并与阿琳结婚的几周之前，他做出了异常冷静的回复：

> 我并没有蠢到被曾经许下的誓言捆绑而赔上自己未来的全部人生——我在不同的情况下做出过承诺……我要和阿琳结婚，是因为我爱她——也就是说，我要照顾她。就这么简单……
>
> 然而，我在这个世界上也有其他的期望和目标，其中之一就是尽我所能地为物理学做出贡献。这在我心目中的分量，甚至超过我对阿琳的爱。
>
> 因此据我所见（或者说猜测），婚姻即使真的对我的主要工作有所干扰，也影响甚微。这一点甚是幸运。我十分确信我能把这两件事都同时处理好。（甚至婚姻带来的幸福感——以及我妻子持续的鼓励与慰藉，可能还有助于我努力工作——实际上，我的爱情在过去并没有对我的物理研究造成影响，所以我也不认为这份感情在未来会有太大的帮助。）
>
> 既然我觉得我能继续从事我的工作，并且也享受照顾所爱之人的乐趣——我打算不久之后就结婚。

不管他们的爱情是否影响了他的物理研究，阿琳显然增强了理查德追随自己物理思想的决心，无论这一思想会通向何处。阿琳使费曼睿智且理性，如果阿琳曾经阅读过这封信，并从中读出冷淡和平静，她或许会从中受到鼓舞，因为这些字句传达了她渴望在她挚爱并崇拜的男人身上培养起来的那种理性的思考。

如果可能，她也会被后来发生的一件令人黯然心碎的事所感动。1945年6月16日，距离理查德参与制造的原子弹在广岛爆炸还有6个星期，阿琳在这个忧郁的日子里与世长辞。她在病房里咽下了最后一口

气，费曼深情地亲吻了她，护士记录下了阿琳的死亡时间：晚上9：21。费曼事后发现，阿琳床边的时钟也恰巧停在了晚上9：21！如果换作是一个感情用事的人，或许会把这一切归因于某种精神上的奇迹或启示——人们可能将它们视作来自宇宙中更高等生命的谕旨。然而费曼知道那个时钟质量不好，因为他曾经亲手修理过几次，所以他认为一定是护士确定阿琳的死亡时间时拿起了它，导致了它的停摆。即使在生命中最黑暗的时刻，他的理性与决心也丝毫没有涣散，一如既往地沿着他于1941年开辟的道路前行，这条路终将深刻且不可逆转地改变我们对世界的认识。

作家露易丝·博根（Louise Bogan）曾经说过："任何旅行，其最初的秘密都在于：旅行者是如何来到起点的呢？"[注]就像许多航海史诗一样，费曼的科学探索之旅的开始其实很简单。费曼和惠勒已完成的工作表明，经典电磁学可以被塑造成一种只涉及不同带电粒子间直接相互作用的形式，无论在时间上是正向还是反向。以此为基础，可以避免任何带电粒子的无穷大的自能问题。而下一步的挑战则是要检验这一理论是否与量子力学相符，是否能解决棘手的数学问题，从而得到一个电磁学的量子理论。

唯一的问题在于，他们的理论相当奇诡，其中充斥着不同时间和空间上的相互作用，以得出与经典电磁学相同的预测结果（经典电磁学需引入电场和磁场来传导这些相互作用），并且需要的数学形式也是当时的量子力学无法处理的。这一问题来自粒子之间在不同时间发生的各种相互作用，或者正如费曼后来所说："某一粒子在某一时刻的路径会受到另一粒子在另一时刻的路径的影响。因此，如果你试图描述这一切……判别当前各个粒子的状态，以及当前这些状态将如何影响未来，你会发现仅仅考虑粒子本身是不可能的，因为粒子们在过去的行为会影响其将来。"当时，量子力学仍然只是基于一条简单的原理：如果我们掌握或者被告知了一个体系在某一时刻的量子态，那么我们就可以根据量子力学的方程精准确定该体系的后续动态演化。当然，准确地知道体系的动态演化并不意味着我们能够准确地预测出测

量结果。量子体系的动态演化所能确定的并非系统的最终状态，而是一组概率，由这组概率可知系统被测量后处于某一特定状态的可能性。

问题在于，根据费曼和惠勒的电动力学公式，我们需要了解大量其他粒子在许多不同时刻的位置和运动，才能确定任何给定粒子在任意时刻的状态。在这种情况下，用以确定该粒子后续动态演化的标准量子力学方法就失效了。

从1941秋季到1942年年初，费曼延续了惯常的做法，以各种在数学上等效的方式对他们的理论进行了阐释。在这一过程中，费曼发现他可以完全依据自己在大学期间放弃的某个原理来重新构建出他们的理论。

你或许还记得，费曼在高中就学到了运动定律的一种表达形式，这个形式并不是基于物体在某一时刻的状态，而是基于物体在所有时刻的状态。这就是拉格朗日的数学表达形式，及他提出的最小作用量原理。

最小作用量原理告诉我们，为了确定一个粒子真实的经典轨迹，我们可以考虑粒子从起点到终点间所有可能的路径，并找出其中能使平均作用量（“作用量”的定义为，构成粒子总能量的两部分——动能和势能——的差值在每条路径上的总和）取最小值的轨迹，这就是物体运动的真实轨迹。费曼当时认为，这一原理有些过于简洁了。为了计算粒子在路径上任何一点的行为而考虑整条路径，这在他看来似乎不符合物理学思想，他宁愿考虑每一点上粒子的受力，再使用牛顿定律来计算轨迹。

但是研究生时期的费曼发现，他与惠勒提出的理论完全可以从作用量原理的角度进行重塑——完全由带电粒子随着时间而变化的轨迹来描述，而不必考虑电场和磁场。现在回顾起来，我们能清楚地理解为什么这一聚焦于粒子路径的形式体系适用于描述费曼和惠勒的理论。归根结底，这些路径完全取决于随时间推移而沿着不同轨迹运动

的粒子之间的相互作用，而这正体现了费曼和惠勒的理论的本质。因此，为了创立一个量子理论，费曼决定为他和惠勒所考虑的那样的系统找到量子力学的表述，其中的经典动力学可根据类似作用量原理的理论导出，而不是用传统的方法来确定。

物理，或者至少是费曼和惠勒想象中的物理，已将费曼带到了他在6年前完全意想不到的境地！在勤勉、深入地探索了他和惠勒二人的新理论之后，费曼的思想发生了惊人的转变。费曼确信，与专注于某一时刻的事件相比，基于探索贯穿整个时空的完整轨迹的作用量原理才是思考问题的正确方式。费曼后来写道："作用量原理可以用来描述整个时空中的路径特征。自然界的行为取决于它在整个时空路径中所具有的某种特征。"然而当时，量子力学严格依赖于通过确定系统在某一时刻的状态，来计算其后续发展，那么该如何将作用量原理应用到量子力学中呢？在普林斯顿的一场"啤酒聚会"上，费曼偶然获得了解决此问题的关键灵感。不过，要想领悟这其中的关键，先让我们将话题稍稍岔开一点儿，重新审视费曼即将改变的神秘的量子世界。

---

1. 出自露易丝·博根的自传体作品《环屋之旅》（*Journey Around My Room*，1980）。——译者注

第4章

漫游宇宙的量子奇境

> 宇宙不仅仅比我们想象的更加古怪，其古怪程度甚至远超人类所能设想的范围。
>
> ——J.B.S.霍尔丹（J.B.S.Haldane），1924

英国著名科学家J. B. S. 霍尔丹是一位生物学家，而不是物理学家，但他对于宇宙的描述——至少对于费曼想要征服的量子力学领域而言——却是再恰当不过的。我们已经了解到，在量子力学效应显著的小尺度上，粒子可以在同一时刻出现在不同的地方，也可以同时在不同的地方处于不同的状态。

能够在数学上对微观粒子这些不同寻常的行为进行定量解释的函数是由著名的奥地利物理学家埃尔温·薛定谔（Erwin Schrödinger）发现的，他在为期两周的时间里所构建的这一函数，如今已成为我们理解量子力学的常规方式。在繁忙的两个星期里，薛定谔也在忙于其他事情——他在瑞士山间的一座小木屋里，与（或许是两位）神秘女郎幽会。这种完美的氛围或许更有助于去想象一个所有经典的行为规则都被打破的世界。

薛定谔提出的这个函数被称为物体的波函数，它解释了量子力学核心的一个奇妙之处，即在某种意义上，所有粒子的行为都像波，而所有波的行为又都像粒子——粒子和波的区别在于，粒子明确地处于某一位置，而波则在一定的空间内延展。

所以，如果想用一个类似波的、具有延展形式的理论描述一个不具有空间延展性的粒子，这个理论就必须适应上述事实。马克斯·玻恩

（Max Born）随后指出，如果自身像波的波函数所描述的不是粒子本身，而是某一时刻在空间中任何给定位置找到该粒子的概率，那么波函数就可以用来描述粒子。如果波函数，也就是发现粒子的概率，在很多位置上不为零，那么粒子表现得就好像同时处在这些不同的位置上。

尽管这种见解看似疯狂，但是到目前为止并没有什么问题。然而在量子力学的核心还存在一个关键的疯狂之处：需要强调的是，物理学家只能说自然界的确如此运行，而无法对此做出基本的解释。如果量子物理学定律决定了波函数的行为，这就表示给定了粒子在某一时刻的波函数，那么原则上，量子力学允许我们以完全确定的方式计算粒子在后来的波函数。到目前为止，它与牛顿定律（告诉我们棒球的经典运动轨迹如何随时间而发生改变）或者麦克斯韦方程组（告诉我们电磁波如何随时间而变化）并没有什么不同。但区别在于，在量子力学里以确定性方式随时间演化的量并不是可以直接观测的量，而是一组概率，它们告诉我们进行某种观测会以多大的概率得到某种结果，比如我们可以根据波函数计算出粒子在某一时刻出现在某一位置的概率。

这已经足够奇怪了，但事实上，粒子在某一时刻出现在某处的概率，是由波函数的平方而不是波函数本身直接描述的。这一事实是量子力学一切古怪之处的源头，因为它解释了为什么粒子的行为恰如波一样。现在我们就来谈谈这个问题。

首先请注意，我们测得某件事发生的概率通常都是正的（我们绝不会说发现某物的概率是–1%），而一个量的平方也总是正的，所以量子力学给出的概率值也总是正的——的确是件好事。然而，这也意味着波函数本身可正可负，因为举例来说，–1/2和+1/2的平方都是+1/4。

若波函数本身可以代表在某位置x上发现某一粒子的概率，那么如果我有两个相同的粒子，则我们在位置x上发现其中任何一个粒子的概

率将会是这两个波函数（每一个都必须是正值）的和。然而，发现粒子的概率是由波函数的平方决定的，并且两数之和的平方不等于两数平方之和，所以在量子力学的世界里，事情会变得更加有趣。

比如在位置x上发现粒子A的波函数值为P_1，在位置x上发现粒子B的波函数值为P_2，那么由量子力学可知在位置x上发现粒子A或者粒子B的概率为$(P_1+P_2)^2$。假如$P_1=1/2$而$P_2=-1/2$，那么倘若我们只有一个粒子，比如粒子A，则在x点发现该粒子的概率就为$(1/2)^2=1/4$。同理，在只有粒子B的情况下，在x点发现粒子B的概率为$(-1/2)^2=1/4$。然而，如果我们考虑两个粒子都存在的情况，则在位置x发现其中任一粒子的概率为$[(1/2)+(-1/2)]^2=0$！

实际上，这种表面上看似荒谬的现象在波的世界里是十分常见的。以声波为例，这样的波能够相互干涉，例如琴弦上的几个波就可以相互干涉，并在弦上形成一些叫作“波节”的地方，在这些波节处，琴弦完全静止不动。类似地，如果室内不同位置有两个扬声器同时发出声波，那么当我们在房间里走来走去时，我们可能会发现在一些特殊的地点，从两个扬声器发出的声音会相互抵消，或者用物理学家的话说，会发生“相消干涉”（声学专家在设计音乐厅时会将此考虑在内，以避免产生这种声音“死角”）。

在量子力学里，概率是由波函数的平方决定的，我们由此可知，粒子也会相互干涉。假如一个盒子里有两个粒子，那么在一些特定的位置发现其中任何一个粒子的概率最终要小于盒中只有一个粒子的情形。

究其原因，当波相互干涉时，波的高度，即“振幅”（amplitude）受到叠加，而振幅的正负取决于考察点处于波峰还是波谷。所以，粒子的波函数也叫作“概率振幅”（probability amplitude），同样可正可负。

就像普通的声波振幅一样，不同粒子之间的单个概率振幅也可以相互抵消。

正是这样的数学背景产生了我们在第2章中所描述的电子在闪烁屏上的行为。我们发现一个电子的确可以与自己干涉，因为电子可以在同一时刻在很多不同的地方具有非零的出现概率。

让我们先来看一下在宏观的、经典力学的世界里是如何计算概率的。假设我们要选择一条从a城途经b城到c城的特定路径。我们用P(ab)代表选择某条从a到b的路径的概率，用P(bc)代表选择某条从b到c的路径的概率。然后，如果我们假设路径bc的选择与路径ab的选择完全无关，那么沿特定路径从a途经b到c的概率就可以简单表示为两个概率的乘积，P(abc)=P(ab)×P(bc)。例如，假设沿某条路从a到b的概率为50%，而后沿另外某条路从b到c的概率也为50%。如果有4辆车从a点发出，那么其中的两辆会沿着某条路到达b，而这两辆中的一辆将会沿某条路从b到达c。这样沿特定路径从起点到终点的概率就是25%（0.5×0.5）。

现在，假设我们不关心在a和c之间途经的b点究竟位于哪个位置，只用“b点”来指代可以途经的所有城市，那么由a到c的概率P(ac)将会是从a到c途经任意b点的概率P(abc)的总和。

这样计算是合理的，因为在经典理论中如果我们从a点到达c点，而b表示在a、c之间我们可以途经的不同城镇的总体，比如从a到c的中点，那么我们必须经过其中的一个b点（图3）。

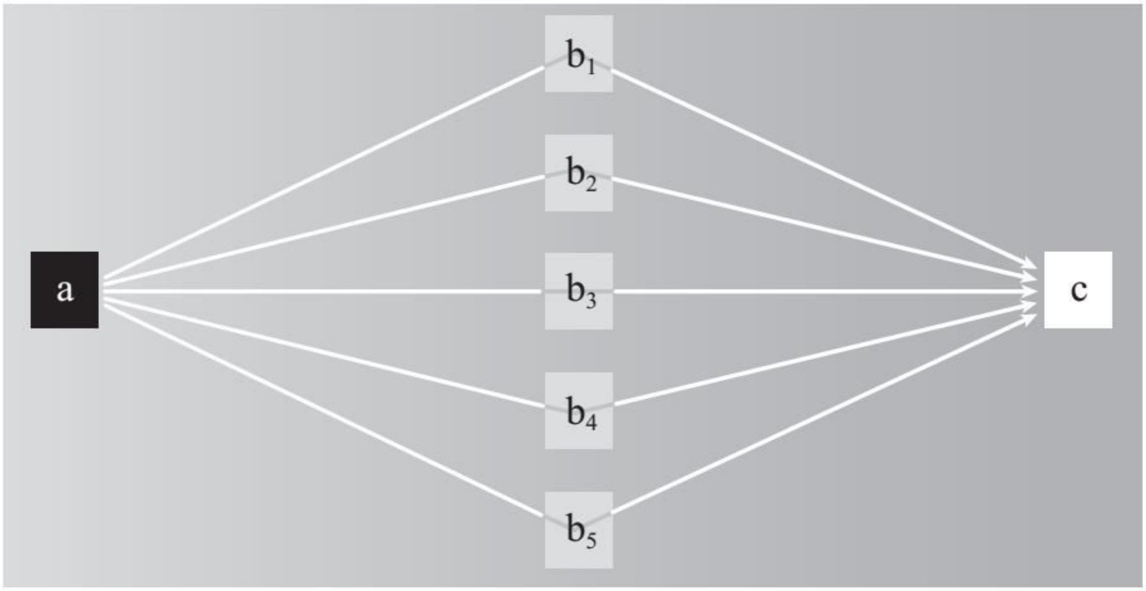


图3 这张图与本书第1章所给出的光线图片十分相似，所以我们可以说，如果所讨论的例子涉及从a点到c点的光线，我们就可以用最短时间原理来确定光通过其中一条路径的概率。而根据此原理，光通过那条所需时间最短的路径的概率是100%，通过任何其他路径的概率是零

问题在于，在量子力学中，事情变得完全不一样了。鉴于量子力学的概率是由从一点到另一点的概率振幅的平方决定的，所以从a到c的概率就不等于从a到c途经任意确定的中间点b的概率之和。这是因为在量子力学中，决定总概率的是路径各部分概率振幅的乘积，而不是各部分概率的乘积。因此，从a到c经过某确定的b点的概率振幅是从a到b的概率振幅与从b到c的概率振幅的乘积。

如果我们不特殊指明哪一个b点为途经的点，那么由a到c的概率振幅又变成了从a到所有可能的b以及从所有可能的b到c的概率振幅之积的总和。但这意味着，实际概率是这些乘积总和的平方。由于在求和中的某些项可能为负值，我们曾在第2章中讨论过的电子打到闪烁屏上时发生的那种疯狂的量子行为可能就会发生。也就是说，假设b和b'两点分别代表两道狭缝的位置，当单个粒子穿过a与c之间两条狭缝中的一条时，如果我们不去测量该粒子途经了这两点中的哪一点，那么粒子到达屏上的c点的概率就取决于这两条不同的可能路径的概率振幅之和的平方。如果我们测量粒子从a到c究竟途经了哪一点（b或是b'），

那么到达c点的概率就是那条路径的概率振幅的平方。在有很多个电子但每次发射一个的情况下，如果不对途经点进行测量，那么屏上的最终图样将取决于每个粒子在两条可能路径上的概率振幅之和的平方；如果对途经点进行测量，那么屏上的最终图样将取决于每个粒子在每条路径上的概率振幅的平方之和。同样，因为两数之和的平方不同于两数平方之和，这两种情形下的概率将大不相同。正如我们已经见到的，如果粒子是指电子，则是否对粒子在起点与终点之间的位置进行测量，确实会带来不一样的实验结果。

量子力学是起作用的，无论它看起来是否合理。

理查德·费曼所关注的，正是量子力学这看似荒谬的一面。他后来描述说，如果粒子从a点到c点的行程中经过了某一确定的b点的论述是错的，那么经典理论的图像就是错的。量子力学允许光同时沿着所有可能的路径行进，允许所有可能的b值，即允许它同时通过所有可能的中间地点。

接着，费曼又提出了一个问题：是否可以从与概率振幅相关的路径出发，而非振幅本身，来重新建构一种量子力学的表述形式？事实证明，费曼并非第一个如此发问的人，却是第一个得出答案的人。

第5章

重新开始

与其从思想或心理学的角度解析事物，我宁愿诉诸数字。

——理查德·费曼

正当理查德·费曼想方设法重构量子力学，以便将他与惠勒的奇怪理论纳入其中时，他在普林斯顿的拿骚酒馆参加了一场他后来称之为“啤酒聚会”的活动。在那里，理查德遇到了当时正在访问普林斯顿的欧洲物理学家赫伯特·耶勒（Herbert Jehle），并被对方问及当时的工作重点。费曼回答说自己正试图以作用量原理为中心发展量子力学。耶勒告诉费曼，量子力学的创始人之一、伟大的物理学家保罗·狄拉克曾发表过一篇相关论文，也许会对他的工作起到关键的作用。耶勒回忆说，狄拉克已经提出了如何在量子力学的背景下使用物理量（根据第1章的内容，这些物理量指的是拉格朗日量，即体系中粒子动能与势能的差值）计算作用量。

第二天，他们去普林斯顿图书馆查阅了狄拉克于1932年发表的题为《量子力学中的拉格朗日量》的论文。在文章中，狄拉克精辟而有预见性地指出，“有理由相信拉格朗日量（方法）比其他方法更为基本”，因为第一，它与作用量原理相关；第二，（这条对费曼后来的工作极为关键，但当时费曼并没有意识到）拉格朗日量可以更容易地将爱因斯坦狭义相对论的结果包含进来。尽管狄拉克确实抓住了问题的关键，但他在文章中仅仅发展了一种形式体系，可用来展示有用的对应关系，并将经典力学中的作用量原理与量子力学中粒子的波函数随时间变化的标准公式进行了模糊的类比。

费曼就是费曼，他当即决定演算一些简单的例子，来验证狄拉克所说的相似性是否存在。当时的费曼只是在做他心目中优秀物理学家应做之事，也就是说，找出一个具体的例子来确证狄拉克想法的真实含义。与此同时，和费曼同处普林斯顿图书馆一间小屋的耶勒，在演算速度上虽不及眼前的这名研究生，却看得更清楚。耶勒说道："你们美国人总是想看看某种东西有什么用处，这的确是一个发现事物的好办法。"

耶勒意识到，费曼将狄拉克的工作又向前推进了一步，在推演过程中，费曼的确取得了重大发现。费曼明确建立了用拉格朗日量对量子力学进行表述的方法。这样，费曼在完全重构量子理论的道路上迈出了第一步。

*

我承认，我对于费曼那天早晨在普林斯顿的表现是否真的超越了狄拉克持怀疑态度。任何能读懂狄拉克论文的人都看得出来，实际上几乎所有的关键想法都已经在文章中了。至于狄拉克为什么没有进一步检验这些想法是否能够实现，我们可能永远也找不到答案。也许狄拉克已然满足于他所展示的可能的对应关系，但他从未察觉出这种对应关系可能会对任何实际问题有用。

狄拉克从未验证过其类比的准确性。关于这一点，费曼的回忆是我们仅有的信息来源。根据费曼后来的描述，在1946年普林斯顿大学200周年庆典上，他与狄拉克曾经有过交谈，当时他询问狄拉克是否注意到其"类比"实际上可以通过引入一个简单的比例常数来加以确证。费曼对谈话内容的回忆如下：

费曼：你知道它们是成比例的吗?

狄拉克：真的吗?

费曼：真的。

狄拉克：哦，那很有趣。

对狄拉克而言，这段对话已经算上长谈了，且很可能意味深长。因为众所周知，狄拉克是一个惜字如金的人。例如他娶了另一位著名科学家尤金·维格纳的妹妹为妻。每次他向人介绍自己的夫人时，总是把她称为“维格纳的妹妹”，而不是他的妻子。显然，在他看来后一事实纯属多余（也可能仅仅证明了他和当时的许多同事一样，轻视女性）。

我还听说过一个与著名丹麦物理学家尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）相关的故事，或许更能凸显出狄拉克的沉默寡言。狄拉克是与玻尔同样著名的物理学家欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）从英国派去的博士后研究员，然而狄拉克“太过安静”，玻尔显然对此有些抱怨。卢瑟福于是给玻尔讲了一个关于一个人走进一家宠物店去买一只鹦鹉的故事。他首先看到一只毛色光鲜的鸟，这只鸟会说10个不同的单词，售价500美元。接着，他看到一只更加艳丽、能说100个单词的鸟，售价5 000美元。随后他注意到了角落里的一只毛色暗淡、肮脏邋遢的鸟，就向店员询价。店员告诉他100 000美元。他不解地问：“为什么？那只鸟一点儿也不漂亮。那么，它能说多少个单词呢？”“一个单词也不会说”，店员的回答令这名顾客目瞪口呆。他问店员：“这边这只鸟很漂亮，能说10个单词，售价500美元；那边那只鸟能说100个单词，售价5 000美元；而角落里那只肮脏的小鸟一个词也不会说，怎么会值100 000美元呢？”店员微笑着回答说：“那只鸟会思考。”

狄拉克在1932年的灵光一现，以及费曼对狄拉克理论内蕴的敏锐捕捉和点石成金般的明确表述（尽管用拉格朗日量的术语表述量子力学的确耗费了一定的时间），都指向同一个事实：在经典力学里，拉格朗日量和作用量函数可以指定a点到c点之间不同路径的简单概率：最终确定一条概率为1的路径，它能使作用量取最小值，而其他路径的概率为0；而在量子力学里，拉格朗日量和作用量函数可以用来计算从

a点到c点各种跃迁方式的概率振幅，而不是概率本身。此外，在量子力学里可以有很多概率振幅不为零的不同路径。

在普林斯顿图书馆的那个早晨，在耶勒惊讶的注目之下，当费曼用一个简单的例子来验证这种想法时，他发现，如果他试图用上述方式计算极短时间过程中产生的各个概率振幅，他将得到与经典量子力学的薛定谔方程一样的结果。更重要的是，在体系大到接近极限的情况下，量子力学效应往往变得微不足道，而经典运动定律将重新支配体系，届时费曼所发展的量子力学形式又将还原为经典的最小作用量原理。

这一切的发生并不复杂。如果我们考虑a点和c点间所有可能的路径，我们可以给每条路径指定一个概率振幅“权重”，与该路径的总作用量成正比。在量子力学中，许多不同路径都具有非零的概率振幅，这些路径在数量上可能是无限的，其中甚至包括那些疯狂的路径，粒子时走时停或瞬间变速等，那么前述每条路径的“权重因子”可以用与该路径相关的总作用量来表示。在量子力学中，任何一条路径的总作用量一定是一个很小的单位作用量的倍数，这个单位作用量被称为“普朗克常数”，它是量子理论中的作用量的基本“量子”。这个常数曾经在本书之前的章节里出现过，它给出了测量位置和动量时不确定性的下限。

费曼进一步采取的量子化处理就是对不同路径的概率振幅所对应的权重求和，而这个和的平方将决定从a点经时间t后到c点的跃迁概率。

权重可正可负，这不仅说明了量子行为的奇怪之处，也解释了经典系统与量子系统之间的差异。因为如果体系较大的话，体系中每条路径的总作用量将远远大于普朗克常数，路径上的微小变化也将导致作用量的变化，这个变化如果以普朗克常数为单位来表示的话，将是十分巨大的。这意味着对于不同的相邻路径而言，权重函数会剧烈地

变化，甚至由正变负。总而言之，当把这些不同路径的效应加起来以后，很多不同的正值项将会被很多不同的负值项所抵消。

然而，事实证明，作用量最小的路径（经典理论中的最优路径）有着这样的特性，即路径上的任何微小变化几乎不会对作用量产生什么影响。因此，作用量最小的路径附近的路径将会为总作用量贡献相同的权重，且不会相互抵消。所以，当体系变得很大的时候，对跃迁概率的贡献将完全由靠近经典路径的那些路径所主导，这些路径总概率的数量级将会接近1，而所有其他路径的概率则接近0。由此，最小作用量原理又被还原了出来。

几天之后，费曼躺在床上难以入眠，他想象着如何通过扩展狄拉克的思想，将他对短时间路径的分析扩展到任意的时间尺度上。这不仅可以说明经典极限是合理的，而且说明费曼量子理论的数学计算可以简化为简单量子体系的标准薛定谔方程。对费曼而言，最令人兴奋的是他已经拥有了一种探索更复杂物理体系的量子力学机制，比如他与惠勒共同构筑的电动力学系统，传统方法无法对这一系统进行描述。

费曼的初衷是扩展量子力学，使其可以描述已有量子理论所无法描述的体系。虽然费曼后来也强调，对于狄拉克、薛定谔以及海森堡的更加标准的方程所适用的系统来说，所有表述方法都是完全等价的，但是重要的是，这种描绘物理过程的新方式为量子世界提供了一种完全不同的“心理”理解。

在这里，“描绘”一词的重要意义在于，费曼为我们提供了一种用以思考量子力学的巧妙又形象化的方法。发展这一新的表述需要一定的时间，哪怕对于费曼来说。他在博士论文中也未能明确讨论“路径求和”的问题。直到6年后（1948年），他才在《现代物理评论》（*Reviews of Modern Physics*）上发表了在自己博士论文的基础上撰写的论文，“路径求和”成了中心问题。那篇论文题为《非相对论量子力学的时空表述方法》，以我在本书中已给出的关于概率的论证开始，

马上转入对时空路径的讨论。令人惊讶的是，文章中没有一张图示。也许在那个年代，让画家来画图价格不菲。没关系，图总会有的。

*

1942年，当费曼写出这些构成他论文基础的推演结果时，世界正处在动荡之中，美国也卷入了第二次世界大战。费曼的烦心事也不少——完成论文、结婚、找工作，可是就在某个早上，这一切都随着罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）对费曼办公室的造访而戛然而止。当时的威尔逊是普林斯顿大学实验物理学专业的一名讲师，他让费曼坐下，并向费曼透露了本应属于最高机密的信息，然而由于这些特定信息才刚刚发生，所以尚未被列为绝密。

当时美国即将开展一个建造原子弹的项目，普林斯顿大学研究组将负责研究制造炸弹原材料的可能方法之一，这种材料就是铀–235（数字235表示原子质量数，即原子核内质子数与中子数之和），铀的轻同位素。核物理计算显示，铀的主要天然同位素是铀–238，但是采用铀–238无法用可行质量的材料制造出一颗原子弹。问题在于，如何将可用于制造原子弹的稀有同位素铀–235从大量富集的铀–238中分离出来呢？因为同一元素同位素之间的差别仅在于原子核内中子的数量，它们的质子数和电子数都相同，同位素的化学性质也相同，这就意味着化学分离技术不可行。威尔逊透露了这个秘密，因为他想招募费曼来帮助他进行理论研究，以检验他所提出的实验方法是否可行。

这使费曼陷入了严重的两难境地。一方面，他切盼论文的完成，很享受正在解决的问题，想继续从事他热爱的科学研究，而且他很想毕业，因为这是他结婚的先决条件之一；(注)而另一方面，威尔逊希望费曼将注意力转移到在费曼看来是工程学的问题上来，这是他在本科阶段曾经涉足过的，但当时为了物理学而暂时放弃了。

费曼的第一反应是拒绝威尔逊的邀请。但同时，他又怎么能拒绝帮助美国赢得战争的机会呢？在此之前，费曼曾经考虑过，如果可以

加入陆军通信兵团，他就应征入伍，但是他被告知这一点无法保证。眼前的机会让他能够以更加重要的角色促使战争结束。更重要的是，他意识到，战争中所涉及的核物理学并不是秘密。正如他后来所说："科学知识属于全人类，是国际化的事物……当时也没有对知识或技术的垄断……因此我们没有理由认为德国人就想不到去实现它。他们也是人，掌握着同样的信息……能阻止他们的唯一方法就是领先一步，这样我们就能阻止他们制造它，或将他们击败。"制造这样一种可怕的武器是正确的事吗？对此，费曼确实有过短暂的犹疑。但最终他把论文放进了书桌的抽屉里，去参加了威尔逊告诉他的会议。

从那一刻起，他暂别了量子力学和电子的抽象世界，投入电子学和材料科学的细节之中。根据他学到的知识，并结合惠勒和维格纳在课堂上对核物理学和材料性质的精彩讲解，费曼一如既往地做好了充分的准备。即便如此，他还是花了一段时间去适应。他和惠勒的另一位研究助理，哈佛大学数学系研究生保罗·奥卢姆（Paul Olum），立刻投入了他们自己并不十分确定的计算工作。而他们周围的实验科学家则在建造装置，他们二人必须对装置是否可行做出判断。

费曼第一次体会到，尽管他热爱理论计算，但在计算结果得到实验检验之前，他并不十分相信它们。他在后来的职业生涯中多次感受到这一点。行走于理解自然的求知边缘令人心生敬畏，然而，要对基于自己的计算所做出的决策负责，且这一决策最终会直接影响一个国家有史以来最大的工业项目，这件事同样令人心怀胆怯。

最终，威尔逊提出的同位素分离装置并未入选，被采纳的是至今仍在使用的离心法。如今，伊朗等国集中大量资源建造离心装置的行为正在引发恐慌。

作为论文导师，约翰·惠勒在这段时间里并没有对费曼弃之不顾。惠勒已从普林斯顿大学离开，来到芝加哥大学与恩里科·费米（Enrico Fermi）合作建造第一座核反应堆，以测试可控链式反应的原理，这是实现制造核弹所需的不受控链式反应的第一步。然而，惠勒一直都了

解费曼研究生阶段所做的工作，在1942年春季，惠勒确定费曼的毕业时机已经成熟。他和维格纳认为费曼的工作已接近尾声，可以整理成文，他也把这种感觉直截了当地告诉了费曼。

费曼悉遵导师的安排。他清楚自己所取得的成果。他在作用量原理的基础上，以路径求和（用数学术语说就是“积分”）的方式对量子力学进行了重新表述，将量子力学推广到了标准薛定谔方法不起作用的情形，尤其是他和惠勒还发展了描述电磁相互作用的吸收体理论。这正是费曼的兴趣所在。通过发展新方法并用它重新推导量子力学，他感到自己又向前迈进了一步。

但是他更加忧心于未竟之事，他在论文的最后部分描述了他当时工作中的局限性。首先，他的论文没有包含任何与实验结果的对照，而他认为实验是任何理论思想都必须经过的测试。造成这一问题的原因之一是他只是重新构造了纯粹的非相对论量子力学，他清醒地认识到，要想结合相对论来阐释真实的涉及电荷和辐射的实验，需要有合适的理论——量子电动力学，这涉及许多他尚未处理的问题。

不仅如此，费曼还关注于如何从物理上阐释他处理量子世界的新观点，特别是，在他的新表述中，如何在量子过程中弥散的路径与固有的概率振幅之间建立联系，以及在任何特定时间上进行真实物理测量的可行性。测量问题并不是个新问题，也不是只存在于费曼的毕业论文中，他的工作似乎只是使这一问题进一步复杂化了。测量仪器所在的世界属于经验中经典世界的范畴，奇异的量子悖论似乎永远不会在此间出现。那“测量”又是如何确保深层量子宇宙最终被我们的眼睛所感知呢?

第一个尝试在量子力学的框架里对测量问题进行综合、定量讨论的人是普林斯顿大学的约翰·冯·诺伊曼，费曼与他有过交流并反对过他的观点。任何对量子力学稍有了解的人可能都听说过，我们无法将观察者与被观察之物分离。但在实践中，为了进行预测并与实验结果进

行比较，我们必须这样做。费曼对如何在他试图进行的特定量子力学计算中分离测量仪器与被观察系统的这一关键问题尤为关注。

对于测量问题的常规描述是：当我们进行测量时，我们会“使波函数坍缩”。换言之，测量行为会使除某一个状态之外其他所有状态的概率振幅立即变为0。因此，系统处在这个状态的概率为100%，而不同的可能状态不再相互干涉，正如我们在上一章所讨论的例子。但有些问题显然无法回避：测量是如何令波函数坍缩的？这种测量为何如此特殊？测量必须由人来进行吗？

撇开“新时代”[注]拥趸们的态度不谈，人类意识在量子测量中并非关键因素。相反，费曼认为，我们必须把体系和观察者放在一起作为一个量子系统来考虑（毕竟，这从根本上是正确的）。如果观测仪器很“大”，也就是说，仪器本身有很多内部自由度，那么我们就能够证明，这样一个大的体系将呈现出经典行为——不同可能的宏观量子状态间的干涉会变得无限小，小到对于所有实际目的而言都无关紧要。

通过测量行为，我们在某种程度上使“大”的观察体系和“小”的量子体系之间发生了相互作用，使这两个体系彼此相关。这种相关最终把小的量子力学体系限定在一个明确的状态，这个状态就是我们“测量”到的状态。从这个意义上讲，我们说小体系的波函数“坍缩”了（除我们测得状态之外的任何其他状态的概率振幅都为0）。这与人类无关。观察体系只需“大”而经典，并且通过测量与量子体系相关。

这仍未完全解决问题，我们仍需追问：是什么构成了复合体系中的“大”的观察者部分，以及什么构成了量子部分？费曼花费了相当长的时间与冯·诺伊曼讨论这一问题。冯·诺伊曼认为，在某种意义上，经典的观察者和被观察者之间的划分必须经由人的主观判断，而费曼对此说法并不满意，因为这听起来就像是一种哲学形式的逃避。费曼相信，既然量子力学是现实世界的基础，那么它应该始终将观察者和被观察者结合在一起，而不是在二者之间进行刻意的划分。事实上，他试图单纯用两个存在相关性的不同子体系（其中一个子体系的尺度趋

于无穷大）来定义测量。如果在这种极限状况下存在非零且有限大的相关性，费曼就将这种情况标记为对于较小子体系的“测量”，随着系统测量者部分的尺寸变得愈来愈大，测量结果可以达到任意精度。他在一份写给自己的备忘录中曾提到有关感光片上的一个斑点的案例，这个案例记录了涉及单个原子的事件。他生动地写道：

> 如果说我们不能精确地看到单原子很多方面的性质，那我们应该期望什么样的结果？事实上，我们看到的是什么？我的建议：只有那些可以和无限数量的原子相关联（且概率是有限值）的单原子性质是可以（通过各种实验手段）测量的。（比方说，我们认为感光片上的斑点是真实存在的，是因为这个斑点能够被放大并投射到屏幕上，或者影响到大量的化学物质，或者影响大脑等——它可以影响越来越大的东西——它能决定一列火车是否从纽约开往芝加哥——或者原子弹是否爆炸等。）

测量理论目前仍然是量子力学领域里令人烦恼的疑难问题。尽管量子力学已经取得了巨大的进步，然而不得不承认，关于我们经验中的经典世界究竟如何在量子现实的基础上产生，我们至今仍未形成一个完整的描述，至少尚未出现让所有物理学家都感到满意的描述。

费曼在论文写作过程中关注这一问题的事例非常重要，因为它显示了还只是一名研究生的费曼在其工作中殚精竭虑、执着应对的是怎样复杂的问题。并且，费曼的“路径积分表述”使得将体系分割成若干部分成为可能（这似乎是量子力学测量概念的核心），允许我们将体系中我们不测量或无法测量的部分隔离出来，与我们希望关注的部分清晰地区分。在量子力学的其他表述中，这通常是无法做到的。

这一物理思想实际上非常简单直接。我们只需将那些我们希望忽略具体细节的路径或部分路径的作用量所对应的权重加起来即可。例如，我们可以对两点之间普通直线路径周边小的环形路径的效应求和——这些环形路径的效应小到我们永远无法对其进行测量。求和的效

应会给作用量带来小的可计算的改变，使总的作用量与不包括环形路径的直线轨迹的作用量有所不同。在进行求和（或者说在有无穷多额外路径的情况下，进行积分）之后，我们可以放下这些额外的环形轨迹而仅专注于那些相对直接的轨迹，只在计算中对此轨迹采用新的、更改了的作用量即可。这一过程被称为“积分掉”体系中的一部分。

乍看之下，这似乎是一个不值一提的技术细节。然而，我们将会看到，它最终对20世纪基础物理学领域几乎所有最重要的理论进步都起到了推动作用，也帮助了我们以量化的方式革新对一些概念的理解，将一些原本模糊的概念界定为科学事实。

1942年，费曼完成了题为《量子力学中的最小作用量原理》的论文，然而他心中还盘桓着另外几件事情。就在他为当年6月的答辩做准备时，他收到了转赴洛斯阿拉莫斯的通知，他将在那里钻研原子弹的实际建造。他同时也在筹划长久以来殷切盼望于毕业后开始的婚姻生活。因此，他不得不暂时将眼下关注的物理问题搁置一旁，去思考他以后的人生。也许正是这些令人分心的事情，使他在对惠勒教授的建议和鼓励表达感谢之余（他与惠勒的合作也基本上就此结束），始终未能想起，他论文的主题（这项研究最终使他赢得了诺贝尔奖），与高中时期那个命定的下午，物理老师巴德先生唤醒他对理论物理学微妙之美的感知的瞬间，存在着一种诗意的关联。

三年过去了，毫无疑问，这是如一生般漫长的三年，战争终于结束了，费曼总算有时间撰写论文以待发表。他仍未想起上面提到的关联。但是，他为怀揣已久的想法构造出了一种清晰的阐述方式。他离开普林斯顿之时的想法仍继续支撑着他，直到他终于可以再度全身心地自由探索量子宇宙中那些更令人陶醉的奇异现象。较之于周遭种种他无力掌控的人世沉浮与疯狂，他更有信心在这样的探索中披荆斩棘：

（路径积分）表述在数学上与其他更通常的表述是等效的。因此从根本上说，这一表述并没有带来新的结果。然而，从新角度看老问题是件乐事。而且对一些问题的解决而言，新角度具有明显的优势……除此以外，人们总是希望从新的角度获得启示，从而对现存理论进行修正，这种修正对于解释当前所有实验结果来说是必需的步骤。

---

1. 学校方面反对费曼结婚，并且表示，一旦他结婚，就考虑取消他的奖学金。——译者注
2. “新时代”（New Age），是20世纪六七十年代起源于西方的一股反叛现代性的文化思想潮流，它强调人类“意识”在“新时代”的巨大转变，“意识”将摆脱物质领域的种种局限，最终升华为一种深层的心灵能力。——译者注

第6章

战争中的蜕变

他是另一个狄拉克，但具有更丰富的人性。

——引自尤金·维格纳对费曼的评价

1942年，理查德·费曼在普林斯顿获得了博士学位。彼时的他是一位相对天真却志存高远的年轻人。在教授和博士同人们的眼中，费曼敏锐大胆，才智超群；在象牙塔外，人们却对他鲜有耳闻。三年之后，走出洛斯阿拉莫斯的费曼已成为一名久经磨砺的物理学家，一个被全世界大多数杰出同行高度认可的学者，同时也是一个有些疲惫不堪且悲观厌世的人。在这种转变过程中，他遭受了至爱之人与世长辞的巨大创痛，也褪去了学术和心理上的稚嫩。费曼的成长是战争环境下的必然产物。

学位证书上的墨迹尚新，费曼便开始履行他在写给母亲的那封言辞平静的信中提到的那个决定：与阿琳结婚。这一决定遭到了双方父母的反对。他们对费曼和阿琳的健康表示担心，认为健康要重于爱情。但反对是徒劳的，因为无论费曼还是阿琳，都视对方为能够抵御一切外来冲击的堡垒，只要彼此相伴，万事皆有可能，未来并不令他们感到沮丧。在费曼搬到普林斯顿的一处新公寓并为婚礼做最终的安排后不久，阿琳写信给理查德，她写道："我们不是蝼蚁之辈——我们是巨人……我知道我们都有未来尚待展开——充满快乐的未来——从现在直到永远。"

无论我们从哪个方面来回顾他们短暂的共同生活，都会唏嘘不已。在他们举行婚礼那天，理查德从朋友处借了一辆旅行车，并在车

里加了一个床垫，以便阿琳可以躺下来。费曼驾车离开普林斯顿前往阿琳的父母家，接走了已披上嫁衣的阿琳。然后，他们一起来到了斯坦滕岛，在那里举行了没有亲朋好友到场的婚礼。接着，费曼将车开到了阿琳的临时新家——新泽西的一家慈善医院！

这短暂的浪漫之后，没有任何隆重的庆祝，也没有亲昵甜美的蜜月，费曼很快回到普林斯顿进入了工作状态。然而，此刻的他暂时无事可做。与威尔逊合作的项目已经被取消，整个团队都在等待新的命令。当时项目的主要活动是在芝加哥展开的，恩里科·费米和惠勒正在那里建造一座核反应堆，因此费曼被派往芝加哥去了解那里的情况。

1943年的芝加哥之旅是一系列机缘的开端，费曼最终与各位同行和学界领袖相逢，并给他们留下了深刻的印象。尽管战争涂炭生灵，让所有人的生活都陷入混乱无序的状态，但至少从两方面来看，战争为费曼带来了千载难逢的机遇——若非战争爆发，则难于获得这样的机遇。

首先，由于在那两年里，当时最优秀、最睿智的科学家从世界各地会聚一处，费曼不用环游全球就有机会与来自全世界的杰出科学家近距离接触，并在他们面前显露锋芒。实际上，自1942年起，在纽约以及马萨诸塞州麻省理工学院辐射实验室定期召开的研讨会上，费曼的出席与表现已令杰出的（尽管后来深陷困境的）物理学家罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer）难以忘怀。而奥本海默不久后即被选为整个原子弹项目的负责人。在芝加哥开展信息收集工作之时，费曼还因完成了一项困扰了理论小组一个多月之久的计算而令该小组成员惊叹不已。

回到普林斯顿，费曼在经过了简单的述职后不久便获知了下一步将要进行的工作。奥本海默此时已经被选为原子弹计划的领头人，并很快选择了新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯作为世界上最先进实验室的建造地点——那里远离城市，有一种与世隔绝的荒凉之美，是青年时代的奥本海默曾经游历过的地方，符合军方对于隐蔽性和安全性的要

求。就这样，洛斯阿拉莫斯成了世界上杰出科学家集中度最高的地方（哪怕像约翰·F. 肯尼迪一句名言中所说的那样，将托马斯·杰斐逊在白宫中独自进餐的时候考虑在内[注]也仍不影响这一结论）。

奥本海默是一位杰出的科学家，更是原子弹计划得以成功的重要人物，同时也是一位独具慧眼的伯乐。在实验室硬件尚未就位、房舍尚未建好之时，奥本海默就已经迅速展开了招募杰出人才、组织研究队伍的工作，并为迁往洛斯阿拉莫斯做好准备。毫无疑问，费曼也在入选之列。1943年3月底，在奥本海默的竭力劝说之下，费曼成了首批抵达新墨西哥州的科学家之一。

奥本海默的征召也在无意之中为费曼与阿琳这对新婚夫妇提供了一个契机。阿琳的病情持续恶化，婚后只活了两年。通常来说，任何婚姻的头几年（如果这段婚姻可以持续几年的话）都应该既浪漫诗意，又充满冒险之趣。若不是因为生活被战争彻底打乱，费曼的博士学习无疑将持续更长时间，他和阿琳会在普林斯顿继续焦虑紧张地生活，与此同时阿琳的病情也日益恶化；而在阿琳去世之前，费曼可能会去一所类似普林斯顿的研究型大学做助理教授。然而，迁往荒寂、陌生的西南部地区的决定让夫妇二人，尤其是阿琳，有机会享受一丝渴盼已久的浪漫与刺激——对于阿琳来说，这原本只能是幻想。

是奥本海默的关心和周全的考虑打动了费曼。被同事们称为“奥皮”（Oppie）的奥本海默，似乎是领导这群具有独立思想的科学家的完美人选，而他也赢得了所有人的尊重。正如费曼后来所说：“我们可以讨论任何技术上的事，因为他什么都懂。”同时，奥本海默对每位应征前来参与原子弹项目的工作人员的个人问题也展现出了不同寻常的关切。这一点，费曼同样铭刻在心：“奥本海默非常有人情味儿。他不光是将我们所有人都召集到洛斯阿拉莫斯……还考虑了一切细节。拿我来说吧，当他动员我去的时候，我提到了自己面临的问题——我的妻子得了肺结核。于是他亲自联系了一家医院，然后打电话对我说他们找到了一个能照顾她的地方。我仅仅是他所招募的众人中的一个，

但他一贯如此，对所有人的个人问题都极尽关照。”奥本海默从芝加哥打给费曼的关于阿琳就医问题的电话，是费曼第一次接到的距离如此远的长途电话，这也许也是令费曼深受感动的原因之一。不管怎样，经过与军方当局的一番协商，阿琳和费曼被安排登上了3月30日从芝加哥开出的圣塔菲“酋长”号火车。阿琳难掩内心的喜悦与激动：

> 最亲爱的里奇(注)——你无法想象，我们这次火车之旅给我带来了怎样的快乐！——这是从结婚以来我一直梦想和期望的……只剩下一天了——我感到兴奋异常，喜不自胜——我的一切都被你主宰，所思所想，饮食起居——我们的生活、我们的爱、我们的婚姻——我们正在建设的伟大未来……多希望明天快点儿到来。

在阿琳的敦促下，费曼买了火车包厢的票，然后他们登上了驶往美国西部的列车。最终，在探讨了几种可能性之后，阿琳被安置到了位于阿尔伯克基的一家疗养院，那里距离实验室（当时尚未建成）约100英里(注)，理查德每周都设法去探望她一次。

从某种意义上说，理查德·费曼一直都在为这段人生经历做准备。在接下来的两年里，费曼所有的天赋都将被充分地调动起来：他闪电般的计算能力，非凡的数学技能，出色的物理直觉，对实验的清晰认识，对权贵的蔑视，以及在核物理学以及材料物理学方面的渊博知识（抵达洛斯阿拉莫斯后不久他就病了，在一封写给母亲的信中，他汇报了自己在医务室的三天中所阅读的化工教材，涉及“流体输运”“蒸馏”等方面的内容），还有他对计算机的痴迷。

费曼在洛斯阿拉莫斯从事的物理工作与他以往进行的学术研究有很大不同。与总结出新的定律以推进物理学前沿相比，这里的工作更容易，但也远比处理纯粹的氢原子单电子问题要更烦琐。除了他对原子弹研发的贡献之外，这一时期的费曼并没有留下太多可以记入史册

的科学遗产（除了一条用于计算核武器效率的公式，即贝特–费曼公式，至今仍在使用，但也仅此而已）。

然而，在洛斯阿拉莫斯的这段经历对费曼的职业生涯产生了深远的影响。一切都要从一次偶然事件说起——世事往往如此。用费曼自己的话说："（那天）大多数大人物都出于这样或那样的原因而离开了镇子，去搬运家具或是做类似的事情，除了汉斯·贝特。当他构思一个想法的时候，他似乎总喜欢找个人一起讨论。他找不到任何人，于是他屈尊来到我的办公室……他开始向我解释他正在思考的问题。一说起物理，我就忘记了自己是在跟谁说话，所以我说：'不，不是这样的！这太疯狂了！'还有一些诸如此类的话。每当我提出反对意见时，我总是错的，但这正是他想要的。"贝特则如是说："我对他（费曼）一无所知……他最近才从普林斯顿获得博士学位，是惠勒的学生。我们聊了起来，很明显，他是个非常聪明的人。他在会议或者小组研讨上，总是提出一些看起来尤为睿智和有洞察力的问题。于是我们开始了合作。"还有一次，贝特回忆道："他从一开始就非常活跃……我很快就意识到他是个能力超凡的人……我觉得费曼可能是整个基地里面最有天分的人，所以我们在很多方面都进行了合作。"

在洛斯阿拉莫斯与贝特的合作对费曼产生了决定性的影响。他们二人的合作可谓相得益彰，不可思议的物理直觉、持之以恒的专注力以及出众的计算能力是二人共有的特质。然而在某些方面，贝特与费曼又迥然相异。贝特冷静而慎重，从容自若，费曼则有些情绪化。这也反映在他们的数学风格上。贝特计算问题时喜欢从头开始，探究到底，无论问题多么冗长或困难。费曼则很有可能从问题的中间甚至结果开始，然后在步骤间来回跳转，直到他确信他是正确（或者错误）的。在其他方面，贝特也是极佳的榜样。费曼喜欢贝特的幽默、不受干扰的处事态度，以及他与人交往时直率与协商的方式。尽管惠勒激发了费曼的热情和创造力，但他终究不是如贝特一般的物理学家。倘若费曼想要不断上升到新的高度，他就需要一个旗鼓相当并可与之并肩前行的人。贝特就是那个人。

在进入洛斯阿拉莫斯之前，贝特已经解决了天体物理学领域最重要，同时也最为棘手的问题之一：太阳是如何发光的？此前百余年间，科学家都在疑惑究竟是什么样的能量过程使得太阳能够在超过40亿年的时间里以我们观察到的光度持续发光。最早的猜想是19世纪早期由一名德国医生提出的，他认为如果太阳是一个巨大的燃烧的煤球，它将以可观测的亮度燃烧约一万年，这恰好与一些基于《圣经》对宇宙年龄进行的推算相符。19世纪晚些时候，两位著名物理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz）和开尔文勋爵（Lord Kelvin）猜测，太阳可能是以引力收缩所释放的能量为动力的，这种方式的能源大约可以支持太阳燃烧一亿年左右。然而，即使后一种猜测也无法解释当时推断所得的太阳系实际年龄——几十亿年数量级的年龄，而不是几亿年。

此后数十年间，谜团始终未解。到了20世纪20年代，英国著名天体物理学家阿瑟·斯坦利·爱丁顿爵士（Sir Arthur Stanley Eddington）提出，太阳内部一定存在某些未知的能量来源。问题在于，对太阳的状况的模拟计算表明，太阳内部的温度不高于1 000万摄氏度，虽然很热，但也没有热到无法解释的程度。换句话说，当时的科学家们认为与这种温度相关的能量所对应的物理过程是相当好理解的，不需要引入更新或更奇特的物理过程。所以，爱丁顿的断言遭到了质疑，引出了他那句著名的斥责：“对那些认为太阳中心的温度不够高，不能发生新的物理过程的人，我会说：去找个更热的地方吧！”

贝特曾与欧洲最伟大的理论物理学家一起进行过研究，其中包括阿诺德·索末菲（Arnold Sommerfeld）、保罗·狄拉克和恩里科·费米。在20世纪30年代早期，他已经确立了自己在新兴核物理领域的权威地位。贝特撰写了这一领域的一系列重量级综述文章，而费曼在本科阶段就对这些文章进行了研读。如果说有谁已经做好准备，去探究为太阳提供动力的新的物理过程，此人非贝特莫属。1939年，贝特做出了一项重大发现。他意识到，物理学家新近发现的核反应（本质上与后来应用于裂变炸弹的反应相似，区别在于，太阳中的反应并非基于重

核，如铀或钚的核裂变，而是涉及轻核的聚变，如氢聚变成更重的原子核）是释放巨大的能量的关键所在。此外，贝特指出，始于质子（这些质子构成了氢原子的原子核）的一系列核反应最终产生了氢以外最轻的元素——氦的原子核，并在这个过程释放出能量，相当于相同数量的氢原子之间化学反应所放出能量的2 000万倍以上。尽管平均来讲，在仅为1 000万摄氏度的温度下，一个氢原子核需要经历10亿年以上的碰撞才足以引发这样的反应，但每秒仍有超过10万吨的氢聚变为氦，释放出的能量足以使太阳以目前的亮度发光100亿年。

由于这一重要的理论发现，1969年，即在费曼因在量子电动力学（QED）方面的研究工作而与人共同获得诺贝尔物理学奖的4年之后，贝特也被授予了这一奖项。而贝特用于解释太阳动力之源的核聚变反应，则在第二次世界大战结束4年后，在发展热核爆炸（又称“氢弹”）的过程中被人为地重新创造了出来。

奥本海默在1942年招募了贝特，并十分明智地将其选为理论分部的负责人，该部门聚集了洛斯阿拉莫斯最为聪明同时又最为自我的人。贝特不仅与这些人智力相当，且具有承担此任所不可或缺的冷静与坚韧，这种性格力量可以帮助他组织领导众人、处理紧急情况，最重要的是，可以帮助他容忍各异的特质。

于贝特而言，费曼正是他所渴望的可以交流思想的人。而贝特之于费曼，则犹如一位可以引航其活跃想象力的完美导师。二人都坚持己见，但这也无妨。值得称道的是，费曼的天分很快得到了贝特的赏识，且贝特做出了一个非同寻常的决定：将24岁的费曼任命为理论分部一个小组的组长，使其位列一些更富经验的年长同事之上。斯特凡·格鲁耶夫（Stephane Groueff）在回忆他们之间的互动时写道：“理查德·费曼的声音从走廊的另一端传来：‘不，不，你一定是疯了！’费曼在洛斯阿拉莫斯理论分部的同事们纷纷从计算机前抬起头来，彼此会心一笑。‘他们之间又开战了！’其中一个人说，‘战舰和鱼雷快艇之间的战斗！’”

人们很容易就能将论辩双方区分开来。然而，除了开怀大笑以及智力上的角逐之外，令这位依旧敏感的年轻人印象至深的是，贝特坚持让每一个理论计算都得出一个数值，并且这个数值应该能够与实验结果相比较。毋庸置疑，这一点对于费曼后来作为科学家而做的每一件事都有深远影响。如费曼后来所言：“我从贝特身上学到了一样特质，那就是要计算数值解。如果你遇到了一个问题，为了真正检验这一问题——你不能对真正地检验这件事置之不理——你一定要算出一个数来；如果你不能踏踏实实地得出一个数值来，那么你与真正的答案之间便相去甚远。因此贝特的态度永远是要把理论用起来。想知道理论是否有效，就要应用理论。”

在洛斯阿拉莫斯贝特手下工作期间，费曼完成了一系列卓越的工作，其成就之多样尤为突出。首先，费曼迅速发展了一个方法来对所谓的三阶微分方程进行数值积分（或者叫求和），这个方程中出现了三阶导数。事实证明，费曼发展的方法比简单的二阶微分方程的解更加精确。而不出一个月，费曼和贝特便得出了计算核武器效率的公式。

此后，费曼转向了一个更具理论挑战性的问题——计算铀–235原子弹里触发裂变的快中子的扩散。针对这一问题，费曼发展了一个方法，这个方法在数学上形似他最终为处理QED问题创造的方法。

在建造原子弹的最后阶段，费曼被委以计算负责人之职，掌管成功组装钚弹所需要的所有计算。约翰·冯·诺伊曼曾表示，钚弹可以由一个剧烈的内爆引发，让常压下稳定的钚密度急剧增大，并超过临界值。1945年7月16日日出之前，人类历史上首枚核弹在沙漠中被成功引爆，试验代号为“三位一体”（Trinity）。这一成功在很大程度上归功于费曼在项目最后几个月在计算方面的领导能力。

费曼的工作涉及使用甚至组装新一代电动机械式计算机，以执行设计新装置所必需的复杂建模计算。这不仅挑战了费曼的数学实力，对费曼的动手能力也是巨大的考验。贝特后来回忆说：

> 费曼能做任何事，简直无所不能。有一阵子，我们理论分部里最为重要的一组人十分担忧计算机的情况……我指派负责这些计算机的那两个人只是在玩儿，他们从未给予我们满意的结果……我让费曼接手了这项工作。他一介入，我们每周都会得到结果——很多结果，很准确的结果。他总是知道需要做什么，且总是知道该怎样去做到……我必须提一下，计算机是装箱送来的——每台机器大概需要10个箱子。费曼和团队之前的一名领导者把机器组装了起来……后来我们从IBM（国际商业机器公司）请来一些专业人员，他们说："从来没有人做到过。我从未看到过外行人能把这些机器组装起来，而且组装得如此完美！"

费曼利用其天赋为原子弹的成功研制做出了巨大贡献，并在此过程中成长为一名成熟的科学家。对此，物理学家、科学史学家西尔万·施韦伯（Sylvan Schweber）曾进行过详细的描述："费曼是个传奇的多面手。他在开锁、修理马钱特–门罗计算器、组装IBM计算机、解谜及解决物理难题、提出新的计算方法、向实验物理学家解释理论和向理论物理学家解释实验等方面的天赋，令所有接触过他的人都钦佩不已。"

按照费曼大学时代的密友特德·韦尔顿（后来韦尔顿也来到洛斯阿拉莫斯与费曼共事）的描述，费曼在洛斯阿拉莫斯所展现出的天赋与活力皆出于一种特性："当面对一个已经被清楚地公式化的物理悖论、数学结果、纸牌魔术或者类似的东西时，（费曼）不解出问题是不会去睡觉的。"施韦伯也同意这一观点，并称这一评价抓住了费曼的典型特征，即"对于'揭开'所谓'秘密'有种近乎偏执的追求"。

在费曼取得这一切成就之际，他的妻子在阿尔伯克基的医院里已生命垂危。这样看来，费曼的成就显得更为惊人。每周费曼都会往返200英里去探望阿琳，要么自驾，要么搭便车。他们之间的通信随着阿琳症状的恶化而愈加频繁，在后期几乎每日一书。字里行间满是对彼此的深爱，以及费曼对阿琳的柔情与关切，令人不忍卒读。

1945年6月16日，距离第一颗原子弹被投向广岛仅剩6个星期，阿琳离开了人世。在她生命的最后4个月里，理查德·费曼给她写了32封信。费曼给医生写信，探索并咨询肺结核的新疗法，并把阿琳转至洛斯阿拉莫斯，以免除异地之苦。然而最终，阿琳与军队护士间的龃龉，以及军事化的管理和生活安排所造成的不便，使理查德又将阿琳送回了阿尔伯克基，尽管他对此忧心忡忡。在费曼写给阿琳的信中，有他对自己在欧洲胜利日那天的醉酒所表示的懊悔，也有他们对阿琳可能怀孕一事的共同担心；信中还提到了家中寄来的包裹、对抗森林大火，以及男人被禁止进入女生寝室的问题（费曼开玩笑说他已经有一年没有进过女生寝室了），但更多的是他对于阿琳的爱。他在6月6日写给阿琳的最后一封信的结尾中写道：

> 我这周会去看你。如果你嫌烦而不想见我，那就告诉护士。我会理解的，亲爱的，我会。我能理解一切，因为我知道现在你已经病得无力解释。我不需要你去解释。我爱你，深爱着你，我会无条件地为你服务，理解你……我爱你这个伟大的、病中的女人。请原谅我理解上的迟钝。我是你的丈夫。我爱你。

同时，在这一困难的阶段，费曼和洛斯阿拉莫斯的其他科学家正在以疯狂的速度，向着制造一颗将永远改变历史进程的炸弹的方向前进。他们情绪高涨，也许这就是让他们持续向前的动力。当德国战败后，似乎没有人问起为什么要制造原子弹。每个人都想目睹自己辛勤的努力所带来的成果，他们想结束太平洋上的这场战争。

对于像我一样成长于大科学和大型官僚系统时代的人来说，曼哈顿计划实施过程中的各种挑战极限的工作强度和速度是不可思议的。从仅仅是理论设想到最终“三位一体”的测试，这一过程只用了不足5年！而从费曼等人被招募，到计划完成，还不到3年！最优秀的物理学家们，相信敌人们（德国人）也在发展核武器，他们以此为动机，在3年内就完成了当今世界可能至少需要10年或20年才能完成的任务。仅

在田纳西州橡树岭实验室进行的同位素分离这一重大项目，在3年中便将世界上的纯铀–235的数量提高了几百万倍。1945年，费曼在极其危险的境况下被派往橡树岭，试图纠正问题——在当今世界，我们可能至少需要花费3年的时间才能拿到环境许可证，项目才能开始实施。

6月16日，费曼匆匆赶到阿琳身边，陪伴她度过了最后的时光。然而阿琳去世后，费曼意识到逝者已不再需要照顾，于是他整理了阿琳的遗物，立刻安排了火化，然后令人惊讶地回到了洛斯阿拉莫斯。尽管悲痛欲绝，但他还是准备在第二天傍晚回到工作岗位。贝特对此表示反对，并命令费曼回长岛的家中休息。费曼的归来令家人始料不及，大约一个月后，新墨西哥州发来的加密电报又将他召回。他于7月15日返回，被载到贝特家中，吃了贝特夫人罗斯做的三明治。然后，他坐上了一辆巴士，前往一处被称为霍尔纳达–德尔穆埃托[注]的荒漠地带，在那里他将与他的同事们会合，一同观看对装置的测试——那个他们在过去三年的时间里不分昼夜地设计和制造的装置，那个将永远改变世界的装置。

每个看到爆炸的人都心生敬畏，但原因各不相同。一些人想起了诗歌，比如奥本海默，浮上他心头的是《薄伽梵歌》中的一句：“我正变成死亡，世界的毁灭者。”而在妻子去世那一刻保持了理性，并避免了随之而来的多愁善感的费曼，在这一刻表现得也异常平静。费曼思考了爆炸冲击波四周蘑菇云的形成过程，思考了当空气在爆炸的高温下被电离从而发光的过程。100余秒后，当爆炸产生的音爆最终抵达观测露台时，他露出了微笑。他费尽心力的计算最终被证实了。

---

1. 1962年，白宫在一场晚宴上宴请了49位诺贝尔奖得主，约翰·F. 肯尼迪总统在致辞时说道：“我觉得今晚的白宫聚集的天分和人类智慧达到了历史的巅峰——不过或许要撇开托马斯·杰斐逊在这里独自用餐的那些日子不计。”——译者注
2. 原文是“Rich”，阿琳对理查德的昵称。——译者注
3. 1英里≈1.61千米。——编者注
4. 原文为“Jornada del Muerto”，西班牙语，意思是“死亡之旅”。——译者注

第7章

一颗升起的新星

用新的角度认识旧事物是一桩趣事。

——理查德·费曼

这是最好的时代，也是最坏的时代。1945年10月，理查德·费曼离开了洛斯阿拉莫斯，成为物理学界一颗耀眼的新星。早在1943年，奥本海默就曾经试图劝说加州大学伯克利分校物理系主任给费曼提供一个职位，他说："从各种意义上来说，他（费曼）都是这里最杰出的年轻物理学家……他的优秀众所周知，不仅在普林斯顿……也获得了这个项目中众多的'大人物'的认可。已经有人向他提供了一个战后可以就任的职位，而且一定还会有别的地方向他提供一些职位。"奥本海默所提到的职位，指的是由一贯机敏的贝特在1943年11月向费曼提供的一份康奈尔大学的教职，这样费曼在洛斯阿拉莫斯工作的同时，实际上可以被认为是正处在康奈尔大学的休假期。然而伯克利分校古板的系主任直到1945年夏天才发出一份工作邀请，并告诉费曼："我们发出的工作邀请从未被任何人拒绝过。"但是费曼拒绝了。他了解并喜爱贝特，后者在康奈尔大学组建了一个杰出的团队。此外，贝特设法让康奈尔给出了比伯克利更好的工作条件，提供了更丰厚的薪水，于是费曼在1945年秋天离开了洛斯阿拉莫斯前往康奈尔，成为第一个离开洛斯阿拉莫斯的团队领导。

奥本海默的预测一如既往地应验了。不到一年，费曼就接到了普林斯顿高等研究院、普林斯顿大学和加州大学洛杉矶分校等机构永久

职位的工作邀约，但全都被费曼拒绝了，他决定留在贝特的团队里。而这些邀约也使他在康奈尔从助理教授晋升到了副教授的位置。

所有这些认可本该振奋费曼的精神，然而，他却显得疲惫、悲观，甚至意志消沉。尽管早有心理准备，妻子的亡故还是使他遭受了重创——阿琳曾经是他的生活支柱。而一种更一般意义上的社会失范感，使费曼的抑郁之感越发强烈：人们意识到核武器可以制造出来，并且美国不会长久地垄断它们。费曼后来回忆称，战后不久，有一次他与母亲一起在纽约，他曾思考如果在纽约投下一颗原子弹的话，究竟会有多少人丧生。

在那一段时间，思考未来似乎毫无意义，因为费曼觉得根本没有未来可言。爱因斯坦就曾说过："除了我们的思考方式之外，一切都变了。"和爱因斯坦一样，费曼在战后没有看到国际关系上的任何改变，他确信核武器将很快被再次使用。如他所说："一个傻子能做到的，另一个也能。"他认为建造一座很快就会被摧毁的大桥是件很愚蠢的事情。所以，他一定也曾想过：为什么还要努力去构建对于自然界的新理解呢？

除此之外，在脱离了庞大、激烈的曼哈顿计划所带来的紧张节奏和强大压力之后，一种失落感也从费曼心底油然而生：智力上的挑战、快速而来的喜悦感、团队合作的精神……这一切在他搬到康奈尔以后都不复存在。在经历了极富成效的战争年代之后，没有了战时那些亟待解决的实际问题和必须立刻付诸实际检验的计算结果，要重新思索那些进展更慢且烦冗抽象的问题，费曼一定倍感艰难。

有关原子弹计划的一些问题，在数学上可能是有难度的，然而这些问题本质上只涉及一些已经被充分理解的物理学或者工程知识。从这个意义上说，解决这些问题就如同解决课堂上的问题一样，这两类问题都是既明确又简单的，只不过原子弹计划中的问题风险高得多，处理起来压力也更大。费曼要重新思考的问题则涉及了艰深的原理，

没有人知道解决这些问题的正确方向是什么。他很可能耗费数年而一无所获。即使在最佳条件下，这种研究也会令人沮丧。

与此同时，费曼担心，在他本可以攻克这些问题的时候，他却浪费了三年的时光，他担心自己已经被世界遗忘。朱利安·施温格（Julian Schwinger）与费曼同龄，时年27岁（在“三位一体”试验不久后，此人与费曼在洛斯阿拉莫斯初次会面，后来与费曼共同获得了诺贝尔奖），但施温格已经有了多项物理学发现（并且在两年后将被任命为哈佛大学的正教授），而费曼则感到自己仍然徒劳无功，没有建树。

最后，以大学教授的身份而突然开始的崭新的职业生涯，也给费曼带来了不小的冲击。他在研究生时期的工作主要是对研究性课题进行深入的探索，在洛斯阿拉莫斯又做了些别的，而新教员生涯伊始的种种琐碎之事扑面而来，足可令对此毫无准备的新教员们手足无措。费曼比其他同事回到康奈尔大学的时间更早，贝特直到12月才返回，因此无法指导费曼适应新工作的角色转换。

完成教学工作所要花费的时间远远超乎想象，而成为一名优秀的教师（费曼显然是数学物理、电学和磁学方面的成功教师），则会使人对自己的研究状态产生一种消极的感觉。爱因斯坦曾经说过，教学是件好事，因为它能给人以每天都有所收获的幻觉。一场好的讲授能够即刻带给人成就感，而研究则可能持续数月却毫无进展。

费曼所受到的打击还不仅于此。理查德的父亲——那个最早鼓励费曼猜解谜题并引导他享受探寻自然之趣的人，那个曾经无比关心费曼的未来并在费曼就职于康奈尔后致信表达自豪之感的人，在阿琳去世一年后突发中风辞世，这使费曼的抑郁状态达到了顶峰。父亲对他的自豪加重了费曼对自身成就的担忧。费曼意识到，自己上一次发表论文已经是他在麻省理工学院读本科时的事了，他感觉似乎自己已江郎才尽——尽管才28岁，但最美好的时光已经离自己而去。纷至沓来

的有吸引力而待遇优厚的工作邀请更加重了这种感受，仿佛他根本配不上这些认可，且再也无法成就重要的事业。

一个人的自我认知与外界评价不同，将使人意志消沉。从我的个人经历来看，我记得当我终于获得了梦寐以求的哈佛大学研究员职位之后，我至少有三个月完全无法投入工作中去，因为在同一座城市做了5年籍籍无名的研究生之后，这种角色的转换使我觉得自己才不配位。当费曼收到普林斯顿大学和普林斯顿高等研究院同时伸出的橄榄枝时，他的反应是："这帮人一定是疯了。"

费曼把自己得以从痛苦中解脱出来归于很多原因，包括他与罗伯特·威尔逊的一次谈话。当时威尔逊已来到康奈尔大学指导新建的原子核研究实验室，他告诉费曼不要担心，更不必感到有压力，雇用他即使会带来风险，也是康奈尔的风险，而不是他的。费曼后来讲述了一个著名的故事，让他清楚地看到了自己乐于研究物理的原因：他看到自助餐厅里一个被抛起的盘子，每旋转两圈就奇怪地摇晃一下，于是他决定找出盘子移动的原因，仅仅是因为有趣。

然而对费曼的恢复起到更大作用的，也许是时光的流逝，是从妻子和父亲去世的阴影中走出，并与因反对自己与阿琳结婚而关系疏离的母亲的和解，以及最终重拾自己在战前所拥有的高效研究能力的强烈愿望。费曼通常是热情而自信的，他的头脑总是致力于探索和解决自然界的谜题，不可能永远沉寂。（贝特后来说，当他得知费曼抑郁的时候，他觉得费曼的抑郁相比康奈尔的其他人来说并不明显："即使抑郁，费曼也比其他人兴高采烈时还要开心一些。"）

在战争年代，理查德并没有完全停止对他所关注的物理问题的思考。他总是随身携带记录着各种计算过程的小纸片，这些计算往往是他在每周去看望阿琳的路上进行的，他通过这些计算重新又回到了怎样建立真正的电磁学量子化理论的问题上。他的首要关注点是，如何把爱因斯坦的狭义相对论恰当地纳入他自己的方程。

我们知道，费曼在本科的时候就已经了解，正是保罗·狄拉克发现了正确描述电子相对论运动的方法，且正是狄拉克有关量子力学的拉格朗日表述的文章，启发了费曼的研究工作并最终成就了费曼的博士毕业论文。问题在于，尽管费曼的“路径求和”法可以得出适用于非相对论量子力学的薛定谔方程，但费曼无法找到一种简单的手段去拓展这一方法，以再现相对论框架下的狄拉克方程。费曼发现，当他计算能量的时候，总是得到一些荒谬的、涉及负数平方根的结果。此外，当他试图计算概率的时候，对所有路径的概率求和的结果并不是100%。

战争结束后，当费曼重新开始审视这些问题的时候，他首先聚焦于看起来比较简单的任务：完善他在1942年获得博士学位时的论文，这篇论文尚未正式发表于学术刊物上。在这里，费曼的另一种人格特质清晰地显现了出来。他将这些研究成果整理出来用于发表的过程并不容易。对费曼来说，为了自己的理解和使用而将研究结果表述为通俗易懂的形式是没有任何问题的——事实上，他经常严格要求自己这么做。但是写作用于发表的论文则需要使用规范的学术形式，省略自己如何得出结果的详细过程，用让其他同行感觉合宜的语言和条理对最终结果进行逻辑连贯的逐步分析。

此外还有一个问题，就是如何使事情沿正确的道路发展。当费曼独立解决那些问题的时候，很多的答案是灵光一现的产物，然后他往往用很多具体的例子去检验自己是否正确。费曼并没有遵循任何清晰的逻辑链条，但他很清楚这是发表文章所必需的。将研究结果转化为可发表的形式需要付出巨大的努力，于费曼而言，这比拔牙还要痛苦。

他的研究成果最终于1947年发表在《现代物理评论》上，在此之前该文曾被更为传统的研究期刊《物理评论》拒绝。然而，若不是费曼在当年夏天拜访了他的朋友伯特·科尔本（Bert Corben）和穆莱卡·科尔本（Mulaika Corben）夫妇，并且在二人的催促下动笔，这篇论文可

能就不会发表了。伯特概述了当时的情形："我们几乎是把迪克锁在了一间屋子里，告诉他赶快开始写。"这个故事逐渐发酵，在物理学家弗里曼·戴森在回忆录中提及这段往事的表述中，穆莱卡在其中所起的作用更为关键，做法也更为极端："她让费曼进入她的房子，把费曼关在了一间屋子里并禁止费曼出去，直到他写出论文为止。我甚至认为如果费曼写不出来，她就不会让费曼吃饭。"而戴森本人在谈到费曼时也曾说过："需要使用极端手段才能劝说费曼写东西。"

不管当时真正的情况是怎样的，重新加工他的学位论文不仅使费曼更新了对此前想法的认知，也使他拓展了这些想法，让他对于量子力学的表述开始变得更加直观。费曼开始从路径的角度进行思考。事实上在他的文章中，费曼第一次明确地用这种新语言——"路径求和"——描述了量子力学。如他后来所言："写《现代物理评论》的那篇文章让我思路更加清晰……我能看到那些路径……每条路径都伴有一个振幅。"通过这项工作，费曼完成了对我们所理解的量子力学的重新表述。要充分认识这一新表述的真正意义，以及它在某些更深的层次上比传统表述更为基本也更为强大这一事实，对费曼乃至整个物理学界来讲，都还需要一些时间。

卸下重负，费曼又回到了试图构造相对论性的电磁学量子理论的问题上。像解决所有类似问题时一样，费曼尝试了所有可能的方式来描绘这一问题。他在给特德·韦尔顿的一封信中这样写道："希望对某一图像进行微小的改动就可以理顺一些现存的问题……的确，我们只需要进行计算，但是图像显然是一种便捷的方式，绘制图像也不算是做什么错事。"

为了理解费曼正在摆弄的图像的本质，我们首先要探索一下狄拉克在发现关于粒子（如电子）相对论性质的著名方程时引入量子力学的一个值得注意的新的复杂性。正如我已经提到的，电子具有一种被称为"自旋"的属性，因为电子具有内禀角动量。角动量是具有一定大小的物体旋转时所具有的性质。在经典理论里，一个点状粒子不具备

这种概念，因为点粒子没有一个可以用来围绕的“中心”（另一个点）使其表现得像是在旋转。为了像一个旋转的自行车轮一样具有角动量，经典理论里的物体必须是在空间上朝某方向延展的。

这一奇怪的自旋角动量，在量子力学中就如同所有其他事物一样，是“量子化”的（也就是说，它的大小必须是某个小量的整数倍），在电子甚至所有物质的行为中都起到了核心作用。例如，环绕原子核运动的电子具备角动量，正如围绕着太阳运动的行星，但电子的轨道角动量是量子化的，这一点最初是由尼尔斯·玻尔发现的。人们发现电子的内禀角动量的值是轨道角动量最小单位的一半，于是我们把电子称为自旋1/2的粒子。

这一性质最终解释了固体物质存在的原因及其行为方式。瑞士最伟大的理论物理学家沃尔夫冈·泡利曾经解释过，原子的性质可以通过“不相容原理”的假设来解释，这一原理指出：多个电子，或者多个其他自旋为1/2的粒子（质子和中子也属于这类粒子）不能在同一时间同一位置以相同的量子力学状态共存。

以氦原子为例，其中绕核运动的两个电子通常不能存在于完全相同的轨道中，除非这两个电子的自旋方向相反，因而在同一轨道中处于不同的量子态。再比如我们考虑下一个最轻的元素——锂，它有三个电子绕核运动，对于第三个电子来说就没有其他的自旋态可供选择，因此这第三个电子就必须在一条（与前两个电子）不同的、很可能是能量更高的轨道中运行。原子的电子能级都可以用这个简单的原理来预测，而我们对于化学的理解都源于此。

类似地，如果我们让两个相同的原子彼此靠近，则不仅这两个原子中带负电的电子之间会相互排斥，且我们由泡利不相容原理可知，还存在额外的排斥——由于同一位置不允许两个电子处于相同的量子状态而造成的排斥。因此，一个原子的电子会被邻近原子的电子推开，这样不同原子中的电子就不会在同一轨道构象的同一位置重叠。

这两种由泡利不相容原理所引起的效应，共同决定了构成我们经验世界的各种材料的力学性能。

随后，意大利物理学家恩里科·费米探索了由很多自旋为1/2的全同粒子（比如电子）构成的体系的统计学行为，结果表明这些多粒子态的行为受到不相容原理的强烈支配。为了纪念恩里科·费米，现在我们把那些自旋为1/2、3/2等半奇数的粒子称为费米子。其他具有整数自旋的粒子，包括光子（电磁场的自旋量子数为1）以及那些自旋为零的粒子等，则以印度物理学家萨蒂延德拉·玻色（Satyendra Bose）的名字命名，被称作玻色子，因为玻色与阿尔伯特·爱因斯坦共同描述了这些粒子的群体行为。

1928年，狄拉克通过“玩弄”[注]自旋1/2粒子的数学表达式，导出了一个可以描述电子的方程，该方程可以解释电子的自旋，且对电子运动行为的描述与爱因斯坦的相对论相符。这是一项了不起的成就，并且带来了一个更为惊人的预测。事实上，这一预测非比寻常，令狄拉克和其他许多顶尖的物理学家难以置信。该理论预测，除电子以外，一定还存在一种类似电子的粒子，对应了方程中的负能量解。然而，由于负能量看起来不符合物理规律——爱因斯坦方程总是把质量与正能量联系起来——对这些新粒子将不得不寻求另外的解释。

狄拉克对新粒子的解释让我联想到了曾经听到的一则老笑话：两个数学家坐在巴黎的一家酒吧里观察附近的一幢大楼。午餐刚开始的时候，他们看到两个人走进了大楼。吃甜点时，他们看到三个人走出了大楼。于是一个数学家转头对另一个数学家说：“如果再有一个人进入这幢大楼，楼里就没有人了。”

类似地，如果我们把负能量解释为比零更少的能量，那么我们可能会利用逆向思维去设想，如果一个电子具有正能量，而一个没有电子的状态具有零能量，那么一个具有负能量的状态包含的电子数就只能小于零。因此，具有与单个电子的能量精确相等且符号相反的能量的状态，就可以被描述为比零电子状态少一个电子的状态。

这种表述在形式上是自洽的，但是从物理的角度来看却是荒谬的。比零个电子还少一个电子的状态，其物理意义是什么？思考电子所带的电荷为我们提供了一条线索：由于电子带负电荷，而零电子的状态带零电荷，那么比零电子还少一个电子的状态将带一个正电荷。换句话说，有负数个电子等同于有正数个带正电的粒子。如此一来，在狄拉克方程中出现的负能量状态，可以解释为表示与电子电荷大小相等但符号相反的正能量粒子。

但是这种奇异的阐述至少还面临着一个主要问题。在自然界中，只有一种已知的粒子带有与电子电荷大小相等、符号相反的电荷，那就是质子。然而，质子与电子迥然不同——比如，质子的质量大约是电子质量的2 000倍。

早在狄拉克导出方程之初，他便马上意识到负能量状态的另一个重要问题。我们曾经提到，在量子力学里，随着体系向前演进，所有可能的态都会经历。尤其是，按狄拉克的话来说，在他的新理论里，“即使没有外加电磁场，电子的能量也可能从正值变化为负值，即发生跃迁，这些多出的能量至少为$2mc^2$，会以辐射的方式自发发射”。简单来说，一个电子可以自发地衰变为带正电的粒子，后者对应了一个负能量的状态。但是这将会改变体系的总电荷，而这种改变在电磁学中是不允许的。此外，如果这个带正电荷的粒子是那个质量大得多的质子，那么这种跃迁也明显地违背了能量守恒。

为了解决这些问题，狄拉克提出了一个激进的假设。如前所述，电子是费米子，因此在每个不同的量子态里只允许有一个粒子（电子）存在。狄拉克设想，如果真空中实际上存在一片拥有无限多负能量电子的“粒子海”，那么这些粒子的所有可能的量子态都已经被占据，这样一来，即便真正的正能量电子衰变成了负能量电子，也不再有允许的态供衰变产物占据了。此外，狄拉克还认为，如果通过某种过程，一个负能量态不再被占据，这将会在负能量电子海中留下一

个“空穴”。空穴对应着在粒子海中一个带负电荷的电子的缺失，可以被认为是一个带正电的粒子，而狄拉克将空穴认作是质子。

狄拉克的论断令人心生疑窦。这一论断首先揭示，真空——空无一物的空间，在某种程度上包含了无数不可观测的粒子，这些粒子对应了那些被填充的负能量的能级，而且其中未被填充的剩余的空穴将会被观测为质子，一种除电荷大小以外与电子完全不同的粒子。

提出充满负能量粒子的无限“粒子海”概念，这一设想体现出了狄拉克在智识上的莫大勇气，然而将粒子海中的“空穴”认作质子，这对狄拉克而言是罕有的智慧上的怯懦。狄拉克的方程中的负能量态似乎与正能量态完全对称，表明这些负能量态与正能量态具有完全相同的质量，这显然与质子比电子更重的事实相矛盾。狄拉克试图规避这一明显的问题，他假设在被填充的粒子海中，粒子之间的相互作用会使可能出现的少数空穴获得额外的对其质量的贡献。

如果狄拉克能再大胆一些，他可以简单地预言这些空穴代表着自然界中新的基本粒子，这些粒子与电子质量相同而电荷相反。但正如他后来所说：“在那个阶段我不敢假定出现了新的粒子，因为当时舆论氛围完全不利于提出一个新粒子。”

对于狄拉克的怯懦，我们或许可以更加宽容，他可能寄希望于借由一种粒子（电子）的不同表现形式来理解当时所有的基本粒子（质子和电子）。这种方式体现了物理学的精神，即用一个硬币的两面性来解释表面上明显不同的现象。无论如何，他的诠释所造成的疑惑并没有持续太久。其他一些著名的物理学家，包括维尔纳·海森堡、赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）和罗伯特·奥本海默研究了狄拉克的理论，并正确地推论出“狄拉克之海”中的相互作用将永远不会增加空穴的质量，并导致空穴与电子质量的不同。最终，连狄拉克也被迫承认，他的理论预测了自然界中存在一种新粒子，他称之为“反电子”（anti-electron）。

1931年，狄拉克做出了让步，这个让步正当其时。仅仅一年之后，大自然就证明了狄拉克的正确性。然而尽管发现了支持新粒子存在的有力证据，但当时人们对存在新的、尚未被观测到的基本粒子的可能性仍持怀疑态度，第一个观察到反电子（也称“正电子”）的研究组并不相信自己的数据。

在20世纪30年代，第一台粒子加速器被设计建造出来之前，几乎所有关于基本粒子的信息都来源于对大自然天体物理加速器——每天轰击地球的宇宙射线的观察。宇宙射线有的来自太阳这么近的天体，有的来自更强大的能量源，比如宇宙另一端遥远星系中爆炸的恒星。1932年，大西洋两岸的两个不同研究组分别在研究宇宙射线的数据。其中之一在英国的剑桥，并与狄拉克处于同一实验室，由帕特里克·布莱克特（Patrick Blackett）领导。该研究组告诉狄拉克，他们已经发现了有关新粒子的证据，但是在掌握更多数据之前，他们还不能将这些实验结果公之于众。与此同时，也许是凭着一股美国式的急性子，美国加利福尼亚州的卡尔·安德森（Carl Anderson）在1932年发表了有关正电子存在的有力证据，并最终因这一发现获得了诺贝尔奖。有趣的是，即便在一年后布莱克特与他的合作者朱塞佩·奥基亚利尼（Giuseppe Occhialini）受安德森发现的启迪而发表了他们自己的结果，他们仍然踟蹰于这种粒子是不是狄拉克设想的粒子。最终，到1933年年底，即使是这些实验学者也不得不承认，如果一个动物“走起来像鸭子，叫起来像鸭子，它可能就是一只鸭子”。狄拉克所预言的粒子性质与观察结果惊人地吻合，无论人们接受与否，电子和正电子（自然界中发现的第一个反粒子的例子）似乎可以成对地出现在宇宙射线轰击原子核时所产生的高能簇射中。

正电子倏然成真！回想起自己最初在预测反粒子存在时，对接受理论结论的犹豫，狄拉克后来表示：“我的方程式比我聪明！”

正是在这些新奇的、革命性的发展背景下，理查德·费曼于1947到1948年间开始发明新的“图像”，将狄拉克的相对论电子整合到自己正

在形成的量子力学时空路径求和图景中。通过这种方式，费曼发现他需要再次重建自己研究物理学的方法。同时，他也试图重塑自我，以摆脱内心深处的极度空虚。

---

1. 狄拉克曾说过："我的许多工作就是玩弄方程式，看看它们能给出什么。"——译者注

第8章

理性的沉沦

> 因此，我猜得似乎没错：电动力学的困境和狄拉克空穴理论的困境是互相独立的，其中一个可能先于另一个被解决。
>
> ——引自理查德·费曼写于1947年的一封信

或许要彻底驯服像量子力学这样打破所有规则的理论，正需要一个愿意打破所有规则的人。当理查德·费曼再次将注意力转向量子电动力学的时候，他已经因为在工作、恋爱及职业互动中对社会规则的蔑视而闻名。即使是在洛斯阿拉莫斯，费曼也乐于制造混乱。比如，他发现安全围栏上有洞，于是从洞里钻进来，再从正门大摇大摆地走出去，这样门卫就会发现他并没有进入的记录，人就已经在里面了；再如撬开保险箱，并在最机密的保险箱里留言。

阿琳之死，以及随“三位一体”核爆炸而产生的虚无主义，令费曼的内心动荡不安，而费曼对此做出的回应是对习俗的抨击和反抗。从那时起，他陷入了与以往不同的状态。费曼从前在女性面前十分羞涩，现在的他却沉溺于女色。在阿琳过世后的几个月里，尽管仍然身处洛斯阿拉莫斯，他已经开始疯狂地与美女约会。两年之后，他终于不再压抑内心的悲伤，他给阿琳写信，坦陈了自己的痛楚：“我敢打赌，你会为两年后的我仍然没有女朋友而感到惊讶（除了你，甜心）。但是你帮不了我，亲爱的，我也无能为力——我不理解为什么会这样，我约会了好多女孩，其中不乏很优秀的……但是在见了两三次面之后，她们都看起来如过眼云烟。”

这样的私情也许令费曼感到空虚，却仍在继续。初抵康奈尔时，费曼看起来仍然像个学生。为孤独感所驱使的费曼约会了在新生舞会上结识的本科生。但他甩掉女性的愿望正如他追求女性的热情一样强烈。1947年，在他给出学生的最终考试成绩之前，他与当时还是研究生的弗里曼·戴森一同离开，进行了一次著名的横跨全国的旅行。这次探险之旅的主要目的是结束费曼与洛斯阿拉莫斯的一位女士之间的情感纠葛。费曼曾持续地向这位女士展开激烈的远距离求爱，甚至令伊萨卡[注]的另一位女士因妒忌而斥责费曼。与此同时，还有第三位女士——为费曼怀孕而又堕胎的几名女性之一——从她写给费曼的信来看，她表现得更为冷静泰然，甚至在信中纠正了费曼对她名字的拼写错误。

在伊萨卡的时候，费曼从未久居一处。他经常与朋友待在一起，通常是已婚的朋友，而这些拜访常因他的风流行径而狼狈收场。几年之后，在他逗留巴西的一年里，费曼实际上已经发展出了一整套勾引女人（包括妓女和酒吧女郎）的简单规则。他已经因为在国外的会议上引诱女性而闻名。

费曼的魅力不难理解。他才华横溢、风趣幽默、充满自信，且极富感召力；他身材高大，岁月的流逝使他变得越发俊朗；那双洞悉一切的眼睛好像有令人沉醉的魔力，而他的活力和热忱更令人深陷其中。

费曼不仅是在与异性相处方面对传统嗤之以鼻，而且每遇到他认为荒谬之事，他都会反抗，通常不受常规的约束。1947年夏天，几位精神病医生对费曼进行了第二次身体检查，这段经历后来变得非常出名，堪比一集艾博特和科斯特洛短剧[注]。由于与精神病医生面谈时情绪突然爆发，费曼被宣布为精神状况不佳，不适宜从事任何工作。当费曼返回工作岗位后，这一结论令他和汉斯·贝特爆发出长达半小时的狂笑。

类似的趣闻会日益增多，最终成为他自己也津津乐道的“费曼神话”的一部分。但是1947年的费曼尚未成名，他不遵循传统的态度与行为的形成过程，恰与他生命中创造力最密集喷发的两年重合。这两年中的一些实验发现让人们确信：若想取得物理学的进步，解决另外一个晦涩难懂的数学问题更为紧迫。

1932年，有关正电子的实验发现为狄拉克的相对论电动力学提供了极佳证明，这是人类历史上第一次在纯粹理论推理的基础上，对一个此前从未被观察到的基本粒子的存在做出直觉判断。然而，这也让那些试图理解狄拉克理论预测的物理学家们产生了令人沮丧的、新的无限疑惑。因为一旦正电子的存在得到证实，物理学家将被迫面对“狄拉克之海”存在的可能性，以及电子与这些新粒子（正电子）通过辐射而发生的相互作用——正是费曼当初希望从电磁学的量子理论中移除的相互作用——所带来的可怕的复杂性。

尽管理论预测的单个电子与单个光子的作用，或单个电子与经典的电磁理论中的光波或无线电波的作用与观察值惊人地吻合，但每当物理学家试图通过多种量子作用来超越这个最简单的近似，或者企图解决长期存在的电子与自身相互作用的问题（费曼在研究生院试图解决的第一个问题）时，他们得到的答案仍然趋向无穷大，这在物理学上解释不通。虽然这在当时几乎对实际应用没有任何影响，但随着时间的推移，对于一些雄心勃勃的物理学家而言，无法从深层次上理解一个明显正确的理论，这种无力成为他们暴露在外的敏感神经。从几位杰出理论物理学家的陈述中，我们可以窥见当时那种覆盖整个物理学界的绝望。海森堡在1929年说，他在试图理解狄拉克的理论时遇到了挫折，他担心自己可能会“被狄拉克永远地激怒”。沃尔夫冈·泡利也在1929年写下了他的担忧（这也颇有预见性地反映了包括费曼在内的许多物理学家后来对物理学最近的发展所表达的担忧）：“我不是很满意……尤其是，电子的自能问题甚至比海森堡开始时所想的还要困难得多。而且我们的理论带来的新结果是十分可疑的，整件事渐渐脱离物理学而成为纯粹的数学问题的风险是非常大的。”

海森堡在1935年写给泡利的回信中说：“关于QED……我们知道已知的一切理论都是错误的。但是为了知道我们应该走向何方……我们必须比当下更清楚地了解现有数学形式产生的结果。”他在后来的一篇文章中补充道：“应将目前的正电子和QED理论视为过渡性理论。”就连狄拉克也在1937年谈及QED时说道：“由于QED极度复杂，大多数科学家都乐见其亡。”

这一理论引起了物理学家们极大的担忧，尤其是伟大的丹麦物理学家尼尔斯·玻尔，他十分担心问题的根源可能就在量子力学本身，或许应该由一种不同的物理学将其取代。玻尔在1930年写给狄拉克的信中说：“最近我思考了大量有关相对论的问题，我坚定地认为，要想解决目前的问题，就必须对现在普遍的物理思想进行修正，新的思想比目前量子力学所设想的还要深刻得多。”

就连泡利也在1936年提出，在处理像狄拉克空穴理论这样的允许无限数量的粒子存在于真空中的体系时，量子力学可能应该被修正。众所周知，电子与其自身的电磁场相互作用而产生了无穷大的自能。在此之上，狄拉克又引入了由反粒子所制造出的另一种新的无穷大的相互作用，使量子力学变得更为复杂。这些新的相互作用所涉及的并非费曼和惠勒极力想要摆脱的媒介光子，而是成对的“虚”电子和正电子。

既然物理学家现在已经知道粒子与反粒子相遇可以湮灭而释放出纯粹的能量辐射，那么原则上讲，反向的过程也可以发生，即由能量完全转变为质量。然而这种转变存在一定的限制条件。例如，一个电子与它的反粒子（正电子）不能湮灭成为单个的辐射粒子（光子），这与炸弹爆炸时所有碎片并不会都朝同一个方向飞去是一个道理。如果电子和正电子发生碰撞时的速度大小相等、方向相反，那么总的动量为零。如果在它们的湮灭过程中产生了单个的光子，这个光子将会以光速带着一个非零的动量飞往某一方向。因此，在一个电子和正电子的湮灭过程中，必须产生至少两个光子，这样这两个发射出的粒子

可以等量地沿相反方向射出。类似地，单个光子也不能突然转变为成对的正电子和电子，必须有两个光子才能形成正负电子对。

但是别忘了随着虚粒子的引入，一切限制都取消了。只要虚粒子能在短到不能被直接测量的时间内消失，能量和动量就都不必守恒。因此，一个虚光子可以自发地转化为一对正负电子，只要正负电子对能在短时间尺度上湮灭并转化回单个虚光子。

光子瞬间分裂为正负电子对的过程被称为“真空极化”。在真实的介质，比如由原子构成的既包含正电荷又有负电荷的固体中，如果我们施加一个很大的外部电场，我们就能够把正负电荷分离开——负电荷被电场推向一方，正电荷则被拉向另一方。这样，原来整体呈电中性的材料将保持电中性，但是不同符号的电荷将在空间上被分离开来，这一过程被称为极化。而真空中一个光子暂时分裂为一个带负电的电子和它带正电的反粒子（正电子）的瞬间，发生的也是同样的事情。也就是说，真空被暂时地极化了。

无论我们把它称为什么，电子曾被认为在其周围有一团虚光子环绕，现在被认为是由许多虚光子以及很多电子–正电子对包围着。从某种意义上讲，这种描绘正是对狄拉克将正电子解释为真空电子海中的“空穴”的另一种思考方式。无论哪种方式，一旦我们把相对论和正电子的存在包含进来，单电子的理论就变成了一种包含无限个电子和正电子的理论。

此外，正如单个电子发射和吸收虚光子造成了计算中出现的电子无限自能一样，虚粒子–反粒子对的产生也在QED计算中造成了一个新的无穷大的修正项。让我们再次回忆一下，粒子间的电磁力可以被认为是由于这些粒子间交换虚光子造成的。如果光子现在可以分裂成电子–正电子对，这一过程将会改变粒子间相互作用的强度，从而造成原子（如氢原子）中的电子和质子间的相互作用能量的偏移。问题在于，计算得出的偏移量无穷大！

令人沮丧的事实是，狄拉克理论对原子中电子能级的预测是非常准确的，前提是只考虑单个光子的交换，而不考虑那些导致无穷量的、恼人的高阶效应。同时，狄拉克对正电子的预测已经被实验数据所证实。如果不是因为这些事实，那将如狄拉克所提到的一样，许多物理学家将宁愿彻底放弃QED理论。

事实证明，要解决所有困难，既不应完全抛弃量子力学，也不应摒弃所有虚粒子，而是要更加深入地理解如何在相对论的框架内实现量子力学的基本原理。这一过程漫长而曲折，其间，费曼乃至整个世界都将清晰地看到，来自关键性实验的指引——它们隐藏在复杂惊人的计算之中，使一切变得日益明朗。

发现问题解决方案的过程，起初进展得缓慢而又混乱，事情的开始阶段往往如此。在完成了发表于《现代物理评论》的那篇论文之后，费曼再次将注意力转向了狄拉克的理论。费曼觉得物理学再一次变得有趣了。尽管个人生活仍然混乱无序，但他的关注点从未偏离那个自本科起就令他痴迷的问题——电子的无限自能问题。这是一个他尚未解决的谜题，就此放手有悖于费曼的天性。

费曼从一个热身问题入手。既然电子自旋只有在量子力学中才有意义，那么费曼可以首先试图弄明白是否可以用他的路径求和表述直接解释自旋。狄拉克理论的一个复杂之处在于，同一个方程里包含了4个割裂的部分，分别用于描述自旋向上的电子、自旋向下的电子、自旋向上的正电子和自旋向下的正电子。因为通常的自旋概念要求有三个维度（一个自旋所在的二维平面，和一个垂直于该平面的自旋轴），所以费曼认为，如果他首先考虑只有一个空间维度和一个时间维度的世界，那么他将可以使问题得到简化，在这个世界中，各种允许的路径也是容易处理的。各路径将仅涉及一维空间，即发生线性的向前或向后移动。

每次一个电子从向右运动“转身”为向左运动时，该路径的概率振幅就乘以一个“相位因子”（在这种情况下，“相位因子”是一个复数，

一个包括–1的平方根的奇异数字），这样，费曼就能推导出适合这样一个二维世界的狄拉克方程的简化版本。复数可以出现在概率振幅中——别忘了，实际的概率是由概率振幅的平方决定的，因此最终结果只会包含实数。

在计算概率振幅时，自旋可能会产生额外的相位，这种观点是有先见之明的。然而，一旦费曼试图超越一维空间，并引入一些更加复杂的相位因子，以处理电子转弯并从不同角度离开等状况，他就得到了荒谬的答案，无法与狄拉克理论相符。

费曼不断尝试各种不同的、发散的方案来重新表述这一理论，但进展甚微。然而，费曼的路径求和方法对一个领域尤为适用。狭义相对论告诉我们，一个人的“现在”可能不是另一个人的“现在”，换句话说，相对运动中的观察者对“同时性”的概念可能是不同的。狭义相对论解释了为什么这种局部同时性的概念是缺乏远见的，以及基本的物理定律如何独立于不同观察者对“现在”的个人偏好而存在。

传统量子力学理论的问题在于它明确地定义了一个“现在”时刻，即初始量子组态的建立时刻，然后确定这一初始量子组态在后来是如何演化的。在这个过程中，物理定律的相对论不变性被掩盖了，因为在我们选择一个特定的空间框架来定义初始的波函数，并将一个精确的时刻选定为初始时刻（t=0）的瞬间，我们已脱离了内在相对论性的、无关框架的理论之美。

然而，费曼的时空图像却恰好使理论中的相对论不变性得以彰显。第一，时空图像是以拉格朗日量为基础而定义的，而拉格朗日量可以明确地写成相对论不变的形式。第二，路径求和方法不可避免地要同时处理全部的空间和时间，因此我们不必局限于去定义一个特定的时间点或空间点。于是，费曼训练自己将QED里的一些此前被分开考虑的物理量结合起来，组合成以某种方式表现出相对论性质的量。尽管在以第一性原理明确重塑狄拉克理论，以解决自己所关心的问题

方面，费曼并没有取得任何实质性进展，但他发展出的技巧在后来的最终解决方案中被证明是至关重要的。

像通常一样，随着实验方面的进展，问题的解答进入了人们的视野。事实上，尽管理论科学家常从实验结果中获取指导性信息，但这一次，实验对于推进理论发展的重要性简直无以言表。至此，无穷量问题令理论科学家们感到很沮丧，但也仅此而已。狄拉克方程的零阶预测在实验可观测的精度内足以解释原子物理的所有结果，因此，理论学家忧虑的那些本应该很小，但实际上趋于无穷的高阶修正，对于在物理学框架内应用理论并不构成实际的阻碍。

理论科学家乐于猜想。但是我发现，除非实验科学家在新的水平上对理论进行了探究并得出了具体结果，否则理论科学家很难严肃地对待他们自己的那些想法，也就很难去严格地探索理论的所有分支，或是为现有问题提出切实可行的解决方案。当时，美国卓越的实验物理学家伊西多尔·伊萨克·拉比（Isidor Isaac Rabi）已将哥伦比亚大学建成了世界原子物理学家的实验之都，他思考了在缺少实验指导的情况下，理论物理学家们无力应对QED的挑战这一状况。有报道称，1947年春天，拉比曾在午饭时对一位同事说："过去的18年是本世纪最为枯燥乏味的时期。"

短短几个月后，一切都发生了变化。如前所述，此前用狄拉克的相对论理论进行的最低阶计算得出了氢原子中质子附近束缚态电子能级的光谱结果，不仅足以解释光谱的一些普遍特征，且除了在实验精度的极限附近出现的一些理论与实验可能的差别（这些差别往往被忽视）之外，理论预测与实验观测值惊人地定量吻合。然而，就职于哥伦比亚大学拉比课题组的美国物理学家威利斯·兰姆（Willis Lamb）的大胆尝试改变了一切，而兰姆是最后几位既精于实验又擅长理论计算的物理学家之一。

回想一下，量子力学在20世纪最初的几十年间取得的巨大成功在于解释了氢的发射光谱。为了解释氢原子的能级，尼尔斯·玻尔特地提

出了量子力学解释：电子在吸收或发射辐射时只能在固定的能级之间跃迁。后来，薛定谔通过他著名的波动方程表明，氢能级可以通过他的波动力学准确导出，而不必像玻尔的原子理论那样进行限定。

狄拉克的相对论版的QED一被导出，物理学家们就可以尝试用狄拉克方程来预测能级，替代原来的薛定谔方程。物理学家们的确做了尝试，并且发现由于相对论效应（例如基于相对论，原子中能量更高的电子质量将会更大）以及狄拉克方程中包含的电子的非零自旋，不同量子态的能级被“分裂”成多个能量非常接近的允许能态。狄拉克的预测与实验观测的分辨率更高的氢原子光谱吻合，原本被认为是单一的发射和吸收频率，现在被证明是被分裂成了两个不同的、彼此间距离很近的光频率。众所周知，光谱的精细结构是狄拉克理论的又一个有力证据。

然而，1946年，威利斯·兰姆决定对氢的精细结构进行比以往更加精确的测量，以此来检验狄拉克的理论。他在实验计划中说明了他的动机：“氢原子是现存最简单的原子，也是唯一存在基本理论计算精确解的原子……尽管这样，在现有实验中，氢原子的观测光谱仍然不能提供决定性的检验……决定性的检验将从测量……精细结构中得到。”

1947年4月26日（在当时，从提出一个粒子物理实验到将其完成只需数月，而非现在的几十年），兰姆和他的学生罗伯特·雷瑟福（Robert Retherford）成功地完成了一项之前无法想象的杰出测量，其结果也同样令人震惊。

狄拉克理论的低阶部分和此前出现的薛定谔理论一样，它们都预言氢原子中的一个电子可以有总角动量相同的两个不同量子态。总角动量是电子的自旋角动量及轨道角动量之和，两个量子态中构成总角动量的每一部分可以不同。然而，兰姆的实验确凿无疑地证明了，处于这两个量子态的电子能量有细微的不同。具体来讲，他观察到氢原子中的电子在其中一个态和一个确定的更高态之间跃迁所导致的光的吸收和发射，在频率上与电子在另一个态和同一个确定的更高态之间

的跃迁存在着每秒10亿周期左右的差别。这一频率差看似很大，但是在氢原子能级间吸收或发射的光的特征频率比这个频率差高1 000万倍。因此，兰姆测量的精确度要能保证测出特征频率的千万分之一的差别。

在狄拉克的开创性理论之后，兰姆在实验中观测到的与狄拉克理论预测之间微乎其微但显然非零的频率差，对当时的理论物理学界产生了深远的影响。狄拉克理论的问题一下子变得具体了。现在，狄拉克的理论不再围绕着一些模糊不清的无穷解，而是可以联系到可计算的真实、有限的实验数据。费曼后来用他特有的妙趣横生的方式描述了这一影响："假设我懂几何学，并且我想找出适合边长为5英尺[注]的正方形的对角线，我必须试着算出它的长度。如果我不太擅长几何学，我可能得到一个无穷解——一个毫无用处的解……我们所追求的并非哲学，而是探索真实事物的行为。于是在绝望中，我直接测量了对角线——看，它大约是7英尺左右——既不是无穷，也不是零。因此，虽然理论给出了荒谬的结果，但我们通过实验着手测量了这个量。"

1947年6月，美国国家科学院在纽约州长岛东端的谢尔特岛的一家小旅馆里召开了一次小型会议，与会者都是耕耘在量子电动力学领域的顶尖科学家（幸运的是，费曼的前任导师约翰·惠勒是会议的组织者之一，因此费曼也在被邀请之列）。这场名为"量子理论基础会议"的会议目的在于探索量子理论中存在的一些突出问题。这些问题在战争期间被暂时搁置，当时费曼和他的同事们正忙于研发原子弹。除费曼之外，洛斯阿拉莫斯的其他重要人物也都出席了此次会议，其中包括贝特、奥本海默以及年轻的理论物理学巨星朱利安·施温格。

这场会议以与之相配的戏剧化方式开场，著名的战争英雄——"原子"科学家们——由警察护送着穿过长岛。正是在这次小型会议上，兰姆展示了他的实验结果，成为会议的亮点。费曼后来把这次会议称为他参加过的最重要的会议。

然而就费曼和其他思考QED问题的理论科学家的工作而言，会议最重要的成果并不是费曼完成的一个计算，而是他的导师汉斯·贝特在从纽约返回伊萨卡的火车上完成的一个计算，在那之前，贝特去纽约看望了自己的母亲，并逗留了几日。计算结果令贝特兴奋异常，于是他从中途的斯克内克塔迪致电费曼，告知了这一结果：按照贝特的习惯，当他掌握了一个实验结果时，无论他使用什么样的理论工具，无论这些工具有着怎样的局限性，他都非要用理论工具推导出一个定量的预测，并与实验结果进行比较。令费曼感到大为惊讶和满足的是，贝特声称虽然他还没有完全理解如何处理伴随QED的奇怪的无穷量，但他已经理解了兰姆观察到的频率位移（当时已经被命名为“兰姆位移”）的大小和源头。

对于费曼、施温格以及同领域的其他人而言，一场挑战已拉开帷幕。

---

1. 伊萨卡是康奈尔大学所在地。——编者注
2. “艾博特和科斯特洛”是20世纪四五十年代美国最受欢迎的喜剧组合。——译者注
3. 1英尺≈0.30米。——编者注

第9章

无法证明的真相

> 许多真相虽可知其存在，却难于将其证明。
>
> ——引自理查德·费曼1965年诺贝尔奖获奖演说

威利斯·兰姆在谢尔特岛会议的开场展示了他的实验结果，此举立刻引出了一个问题：观测结果与狄拉克QED理论之间的偏差是由什么原因导致的？会议的主导者奥本海默提出，频率位移的源头可能就在于QED本身，或许有人能真正找到妥善处理QED理论中非物理的高阶无穷修正的方法。贝特的努力方向是建立在奥本海默、物理学家H. A. 克拉默斯（H. A. Kramers）以及维克托·魏斯科普夫（Victor Weisskopf）的想法之上的。魏斯科普夫后来离开了麻省理工学院，成为日内瓦欧洲核子研究实验室（现称CERN）的首位负责人。

克拉默斯强调，由于电磁学中的无穷量贡献问题可以一直追溯到经典的电子自能问题，物理学家在表达计算结果时，应更多地聚焦于有限的可观测量上。比如，出现在方程中的电子质量项，会反过来得出无限自能修正，因此它不应被视为能够代表粒子的可测量物理质量，而应称之为“裸质量”（bare mass）。如果方程中的裸质量项是一个无穷大的量，也许此项与无穷大的自能修正会互相抵消，留下的有限的剩余部分刚好与实验测得的质量相等。

克拉默斯提出，至少对于非相对论性运动的电子而言，在电动力学中算出的所有无穷量都可以用对电子静止质量的无穷自能贡献来表达。在这种情况下，只要把所有的结果用有限的观测质量来表示所有实验结果，以移除该无穷量，那么所有的计算都可能得到有限解。如

果按照这种方式处理，在基本方程中出现的质量项的量级，或者说归一化因子将会被改变，因此这一过程也被称作“重正化”（renormalization）。

魏斯科普夫和施温格明确地考虑了把这种思想应用于电动力学的相对论量子理论上，并取得了进展。特别是，他们证明了在考虑了相对论效应后，电子自能的计算值中的无穷量实际上变得不那么巨大了。

在这些讨论的激励下，贝特对公式中的这一有限项进行了近似计算。正如费曼在诺贝尔奖致辞中所言：“贝特教授……身上有这样一种特质：如果出现了一个很好的实验数据，他一定会从理论上将其重现。于是，贝特用当时的量子电动力学理论得到了（氢原子）两个能级分裂的解释。”贝特的解释无疑是这样的：如果电子、空穴和相对论的效应能够在某种程度上解决无穷量的问题，那么或许可以用更容易掌握的非相对论理论进行计算，然后再忽略那些能量高于测量得到的电子静止质量的虚光子的贡献；只有当总能量超过静止质量时，相对论效应才会发挥作用，也许这样就确保了高能量虚粒子的贡献变得无关紧要。

当贝特在计算中对虚粒子使用了这种随意指定的能量截断后，他得到氢原子中两个不同轨道的态上发生光吸收或发射的预测频率位移约为1 040兆赫，这与兰姆的实验观测值刚好吻合！

费曼虽然才智过人，但他坦承自己当时并没有完全领会贝特的结果。后来，贝特以此为题在康奈尔做了一次报告，并指出如果可以对理论中的高阶贡献进行全相对论式的处理，或许不仅可以得到更加准确的结果，而且可以证明这一结果与他所采取的特定计算过程是一致的。直到这时，费曼才充分认识到贝特所得结果的重要性，以及如何利用自己此前所做的工作去改善贝特的估算。

报告结束后，费曼找到贝特并告诉他：“我可以帮你做到这一点。我明早就给你结果。”费曼的信心基于多年来以作用量原理和自己的路

径求和方法重塑量子力学的辛勤工作，这为费曼提供了一个可实现相对论计算的起点。费曼发展的数学形式实际上允许他调节粒子的可能路径，从而有效地限制计算过程中考虑的虚粒子的最高能量，以约束量子力学计算中的趋于无穷的项，而且正如贝特所要求的，这种方式也是符合相对论的。

唯一的问题在于，费曼从未真正从头至尾地计算过量子理论中的电子自能问题，于是他来到贝特的办公室，在那里贝特向他解释了如何进行计算，而费曼也反过来向贝特解释如何使用他发展的表述形式。当费曼和贝特在黑板上进行演算时，他们犯了一个错误，这一错误成了影响物理学未来的一桩偶然事件。最终的结果是，他们当时得到的答案非但不是有限的，而且那个无穷量甚至比在非相对论计算中得到的还要糟糕，使得从其中分离出有限量变得更加困难了。

费曼回到了自己的房间，他确信正确的计算应该给出有限解。最终，按照典型的费曼方式，他决定巨细无遗地钻研如何以传统的、使用空穴和负能量态等概念的复杂方式进行自能计算。一旦他详细了解了如何以传统方式计算自能，他就有信心以他发展的新的路径积分来重复这一计算，做出必要的修正以使结果变得有限，同时遵循相对论的规律。

当一切尘埃落定时，结果恰如费曼所愿。将所有的量用实验测得的电子静止质量表示出来以后，费曼得到了有限大小的结果，这其中就包括了对兰姆位移的高精度计算结果。

事实上，差不多在同一时期，其他一些物理学家也掌握了相对论计算，这其中包括魏斯科普夫和他的学生安东尼·弗兰奇（Anthony French），以及施温格。而且施温格更进一步，他的研究不仅可以将无穷大量转化为有限量并计算出兰姆位移，利用他的研究成果还可以计算由哥伦比亚大学的拉比研究组发现的未修正的狄拉克理论预测的另一个实验偏差。这种效应与电子磁矩的测量值有关。

由于电子的行为仿佛是在旋转，并且电子带电，所以电磁学告诉我们，电子的行为应该像一个微小的磁体，其磁场强度应该与该电子自旋的大小相关。但是对于磁场强度的测量显示，测量值与简单的低阶计算预测值之间的偏差约为1%左右。尽管这一偏差量很小，但就测量的准确性而言，这与计算预测值之间的差别是真实而显著的。因此需要在高阶层次上理解理论，才能知道理论是否与实验数据吻合。

施温格表明，他的计算方法，即将其他方法中会出现的无穷量分离出来并修正为明确定义的量，然后以像测量的电子静止质量这样的量来表示所有的计算结果，可以得到在电子的正常磁矩中的预测位移，且与实验结果相一致。

听闻施温格的计算之后，拉比给贝特写了一封欢欣鼓舞的短笺，贝特也回信提到了拉比的实验："你的这些实验给理论带来了全新的视角，并且这一理论在短时间内就取得了蓬勃发展，这真是太棒了。这就像量子力学发展的初期一样令人激动。"

QED终于走出了漫长而蒙昧的理论萌芽期。此后几年中，该理论给出的预测与实验结果之间的一致性达到了科学史上前所未有的高度。从这个角度来看，QED是最好的科学理论。

如果费曼仅仅是正确给出了怎样计算兰姆位移的众人之一，他的贡献或许不会被人们纪念至今。不过，费曼在计算兰姆位移上所做的努力，以及他对于如何解决计算中无穷量的理解，对物理学发展的真正价值在于，这让他开始计算越来越多的东西。在这个过程中，他运用了自己超强的数学技巧，以及在重新表述量子力学的过程中所培养出的直觉，逐渐发展出一种描绘QED中所涉及现象的全新途径。费曼提出了一种用理论进行计算的杰出的新方法，这一方法基于图解的时空图像，而时空图像本身是建立在路径求和方法基础上的。

费曼解决QED问题的方法独树一帜，同时也伴随着高度的随意性。他经常简单地猜测公式可能是什么样的，然后将自己在不同情况下的猜测与可用的已知结果进行对比，以此检验自己的猜测是否正

确。此外，尽管他的时空方法允许他以符合相对论的方式写下其数学形式，但他所进行的实际计算并不是直接从一个统一了相对论与量子力学的系统数学框架导出的，即使事实证明，所有的计算结果都是正确的。

事实上，将相对论和量子力学结合起来的系统框架至少在20世纪30年代就已经存在了。这一框架被称为“量子场论”，本质上是一个关于无穷多粒子的理论，这或许就是费曼避免使用它的原因。在经典电磁学里，电磁场是一个可以用时间和空间中的每一点来描述的量。当用量子力学处理场的时候，人们发现可以用基本粒子来理解场，这里的基本粒子就是光子。在量子场论里，场可以被认为是一个量子的物体，在空间的每一点具有一定的概率产生（或者湮灭）一个光子。这就意味着我们可以认为电磁场的涨落产生了无限多的暂时存在的虚光子。这一复杂性正是促使费曼以一种让光子完全消失并允许带电粒子直接相互作用的方式创新地重构电动力学的最初动力。费曼以路径求和的方法对这些直接的相互作用进行了量子力学的处理。

在设法将狄拉克的相对论电子理论融入自己的QED计算框架的过程中，费曼偶然发现了一个美妙的数学技巧，这一技巧可以简化大量的计算，并且不再需要将粒子和空穴视为独立的实体。但与此同时，这一数学技巧也证明了一个事实：当相对论被纳入量子力学中时，我们将无法继续生活在一个具有有限个粒子的世界里。要统一相对论和量子力学，我们需要一种能处理任意时刻存在的数量无限的虚粒子的理论。

费曼采用的这一数学技巧可以回溯到约翰·惠勒此前向他提出的一个想法，当时惠勒认为世界上的所有电子都可以被认为是由一个电子产生的，只要这个电子能够在时间上既能正向也能反向运动。一个在时间上反向运动的电子看起来就像一个在时间上正向运动的正电子一样。这样，一个在时间上既正向又反向移动的电子（当它在时间上反向移动时，相当于它伪装成了正电子）可以在任何时刻大量地自我复

制。不过，费曼轻而易举地就指出了这一构想中的逻辑缺陷。他提出，如果惠勒说的是真的，那么在任何时刻都会有与电子数量相等的正电子存在。但是在普通物质中检测不到正电子。

然而时隔多年，费曼突然意识到，将正电子视为在时间域上反向运动的电子，这一想法可以被用在另一个背景之下。物理学家在试图进行相对论计算时，通常必须将电子和空穴结合起来，费曼意识到，他可以在时空图像中仅仅考虑电子，但是允许电子在时间域上既正向又反向运动，这样他就可以得到与同时引入电子和空穴相同的结果。（这也是多年前的夏日午后，我的高中物理老师试图激发我对物理的兴趣时胡侃了一下的东西。）

为了理解费曼对电子和正电子进行统一处理的思想是如何产生的，最为简单的办法是对照着费曼最终为自己绘制的示意图开始思考，费曼用这些示意图来描述出现在他的量子力学路径求和方法中的时空过程。

考虑图4，这幅图描绘了两个电子间交换一个虚光子（电子A发射虚光子，被电子B吸收）的时空过程：

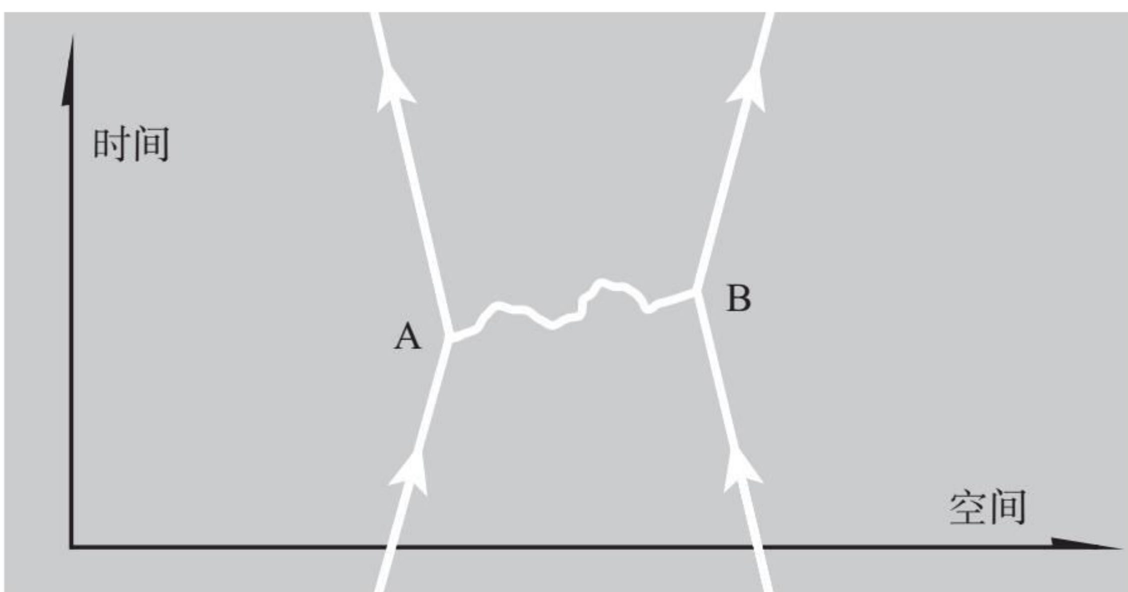


图4 两个电子间交换一个虚光子的一种可能过程

为了计算这一过程的量子力学振幅，我们需要考虑与两个粒子间交换一个虚光子相对应的所有可能的时空路径。由于我们没有观测到光子，所以图5的过程（B先于A出现，光子由B发射而被A吸收）也对最终的总和有所贡献：

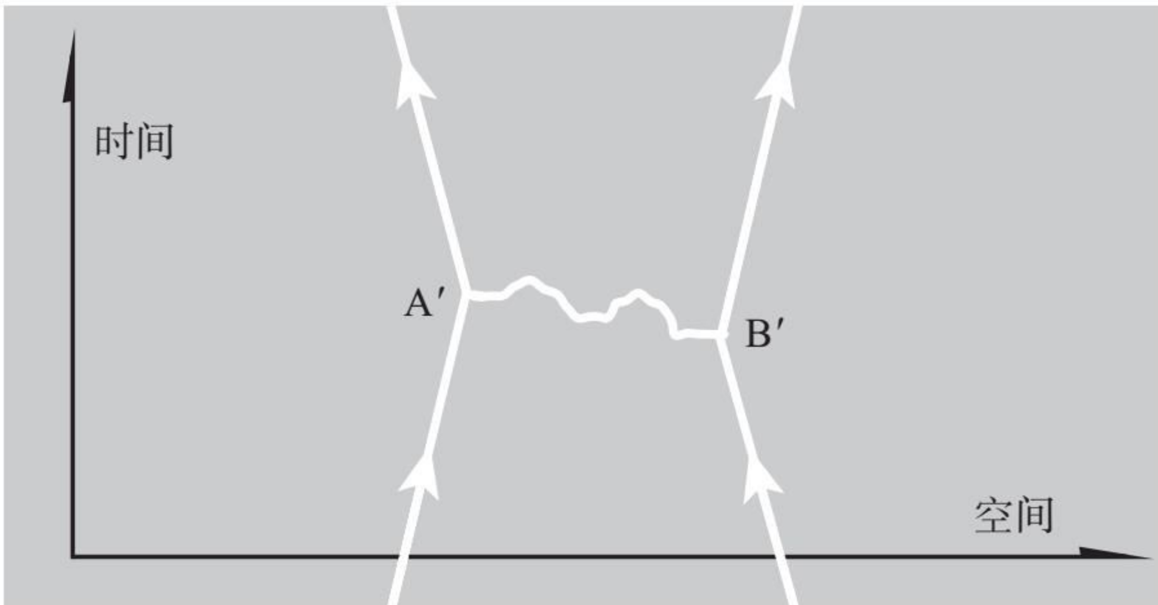


图5 两个电子间交换一个虚光子的另一种可能过程

现在，我们还可以用另一种方式来思考这两幅示意图。请谨记我们正在处理的是量子力学，因此在多次测量之间，任何与海森堡不确定性原理相符的情况都是被允许的。所以，举例来说，虚光子在两个粒子之间运动的过程中，并不需要始终以光速行进。但是狭义相对论告诉我们，如果虚光子超光速运动，那么在某种参考系内，虚光子可能看起来就像在沿时间轴做反向运动。如果虚光子在时间上反向运动，那么它将由A发射，然后被B吸收。换句话说，第二幅图所对应的过程与第一幅图相同，唯一不同的是在第二幅图中虚光子正在超光速运动。

事实上，尽管费曼当时从未明确指出，但据我所知，上述效应解释了为什么相对论电子理论（狄拉克理论）需要反粒子。一个光子并不具有电荷，它从A到B沿时间反向运动看起来就像是一个光子从B到

A沿时间正向运动。但是，一个带电粒子沿时间反向运动看起来却像是一个带有相反电荷的粒子沿时间正向运动。

因此，一个电子（e–）在两点间运动的简单过程，如图6所示：

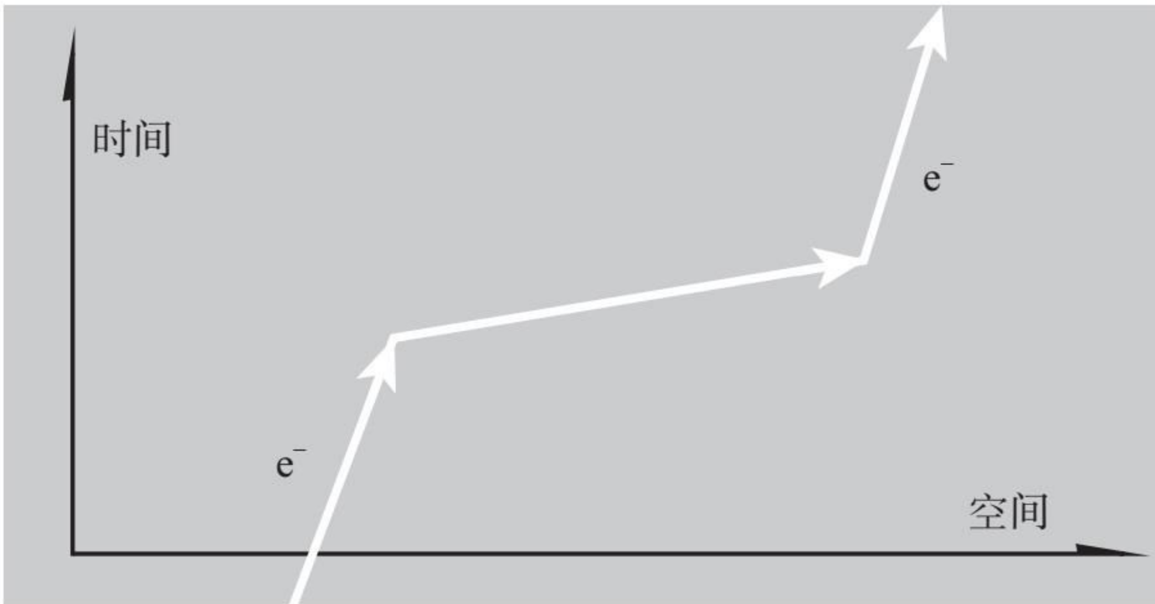


图6 一个电子在两点间运动的一种可能过程

并且一定伴随着如图7所示的过程：

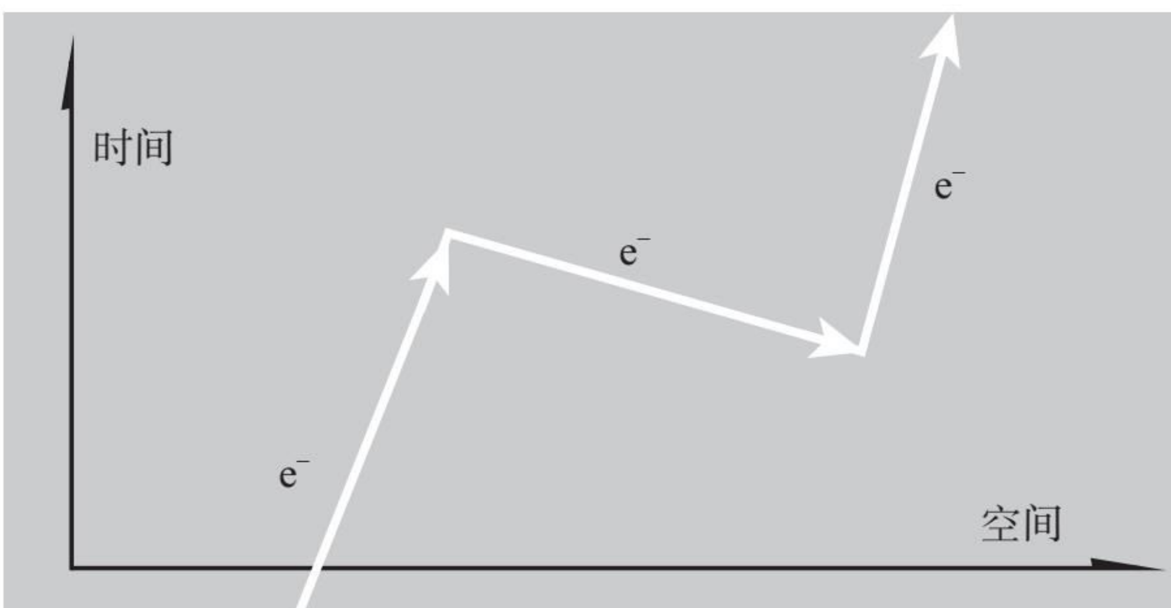


图7 一个电子在两点间运动的另一种可能过程

但是后面这一过程也可以用一个起媒介作用的正电子（e^+）来描述，如图8所示：

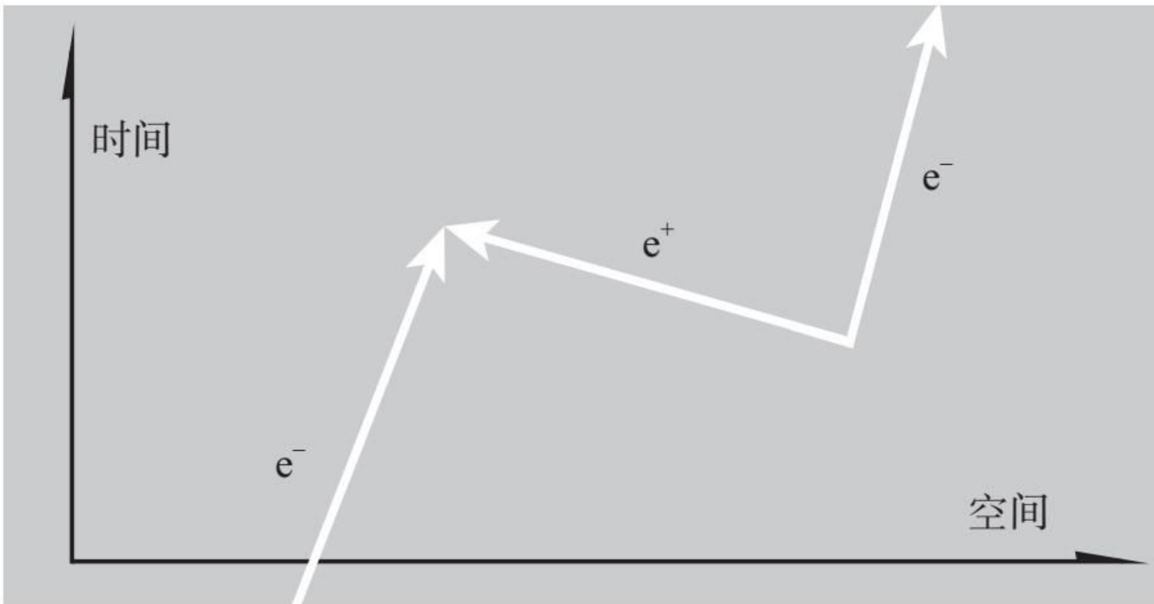


图8 沿时间反向运动的电子可用沿时间正向运动的正电子代替

换句话说，开始时只有一个电子开启了旅程，在另一点上一个电子–正电子对在真空中产生，同时一个正电子在时间轴上正向运动，最终与第一个电子相遇后湮灭，而在旅程的终点只留下最后一个电子。

费曼后来在他1949年的论文《正电子理论》巧妙地描述了这一情形。费曼使用了一个著名的比喻，是关于轰炸机上的一名投弹手俯瞰其视域内的一条道路的情形（刚刚结束的世界大战无疑对费曼在类比物的选择上产生了影响）："这就好像是低空飞行的飞机上，一名投弹手正透过瞄准器观察地面上的一条路，他突然看到了三条路，直到其中的两条合二为一并且消失时，投弹手才意识到他仅仅是经过了一段长距离的'之'字形转弯。"

因此，相对论量子理论中的粒子数本就应该是不确定的。正当我们认为我们有一个粒子时，一个粒子–反粒子对就会从真空中蹦出来，

使总粒子数变成3。在反粒子湮灭掉一个粒子（要么是与其共同出现的那个，要么是最初的那个粒子）之后，粒子数再次变为1，这就像投弹手通过投弹瞄准器所看到的情形一样。同样，关键之处在于这不仅仅是可能的，而且正是相对论所需要的。因此，事后看来，除了在电子和光的相对论理论中引入反粒子之外，狄拉克别无选择。

费曼在他的图解中指出了将正电子视为时间反演电子的可能性，此事甚为有趣，因为这意味着他早期回避量子场论的做法是错误的。他用于计算QED物理效应而绘制的时空扩展图其实已经隐含了一个理论的物理内容，在这个理论中，一个粒子可以被创造或湮灭，并且中间物理过程的粒子数是不确定的。物理学规律迫使费曼重现了量子场论的物理内容。事实上，早在8年前，在1941年一篇名不见经传的文章中，瑞士物理学家恩斯特·斯蒂克尔贝格（Ernest Stückelberg）就独立地思考出了时空演化图，并将正电子作为时间反演电子来处理。然而，斯蒂克尔贝格并未获得足够的动力以完成费曼最终用这些工具完成的项目。

既然我们已经熟悉了费曼绘制的示意图——这些示意图最终被称为“费曼图”，那么现在我们就可以描绘出其他原本与电子自能和真空极化相关的无穷大过程，如图9和图10所示。



图9 自能（一个电子与其自身的电磁场相互作用）

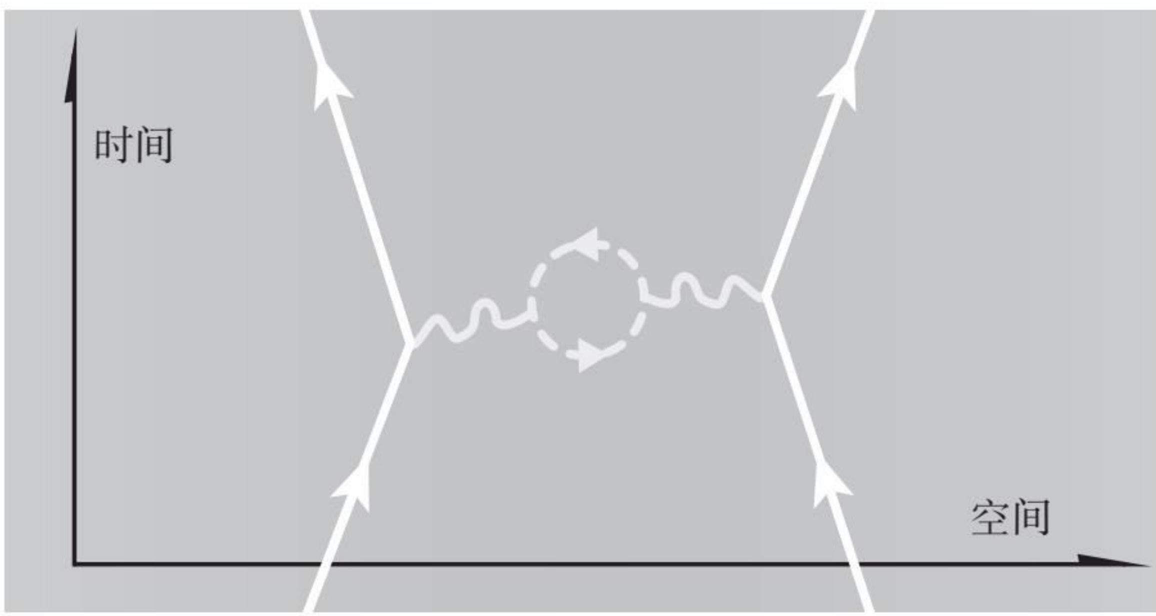


图10 真空极化（一个虚光子分裂为一个电子–正电子对）

然而在费曼看来，上面这两张图存在本质上的区别。图9可以认为是一个电子先发射一个光子然后再重新吸收它时自然发生的。可是图10看起来并不是自然而然的，因为这不是由一个电子在时空上正向或

反向运动以及相互作用的轨迹导致的——费曼觉得唯有这些轨迹适合纳入他的计算。因此，费曼对于引入这些新过程的必要性持谨慎态度，起初并未将它们引入。结果，当费曼试图导出一个框架以避免狄拉克理论中所有的无穷量问题，并明确导出对物理过程的预测时，这一谨慎的决定给费曼带来了一系列的麻烦。

费曼方法的第一个巨大成功在于电子自能的计算。最为重要的是，费曼找到了一种能在极小的尺度和极高的能量上去改变电子和光子的相互作用的方法，并且这种方式符合相对论的要求。从图上看，这种方法对应于费曼图中的自能圈变得非常小的情况，并且将所有小圈（以及更小的圈）的相互作用进行了改变。这样就可以导出一个具有有限值的中间结果，且可以证明在圈越来越小的极限下，该结果与小圈的相互作用的变换形式无关。最重要的是，正如我之前所强调的，因为圈考虑了发射和吸收时间的任意性，同时也包含了在时间域上正向和反向运动的物体，费曼的改变形式并没有破坏理论中的相对论行为，因为相对论行为不应该取决于任何观察者所定义的时间。

正如克拉默斯和其他人曾经预测的那样，其中的关键在于让改变之后的圈的贡献有限，或者按后来的说法，用一种与相对论一致的方式将这些圈“重正化”。这样如果我们想表示物理量的修正，比如用电子的物理质量和电荷表示氢原子场的电子能量的修正，在消去那些不改变小圈则会变成无穷量的项之后，剩余的部分就会是有限大小的，并且与我们所做改变的显式表达无关。更重要的是，即使我们在极小的尺度上改变这些圈，在这样的尺度上用其他方式处理圈仍然会产生无穷大的结果，但采用费曼的方法，上述剩余部分的贡献却仍然是有限的。重正化是有效的！有限大的修正结果与实验测得的兰姆位移相当吻合，作为量子理论的电动力学被证明是正确的。

然而不幸的是，费曼考虑电子自能时用于改变小距离尺度下的理论的过程，在考虑真空极化示意图的无穷大效应时是无效的。对于这些在未经改变的情况下也能保持良好的数学性质的小的电子–正电子

圈，费曼没能找到合适的改变方法。除了认为这些示意图从物理学的角度看可能不适用于手头的问题之外，这可能是费曼在最初的兰姆位移计算中忽略它们的另一个原因。

1948—1949年，费曼一直被这个问题困扰。他凭直觉推测出方程中各种由于电子–正电子圈的改变而产生的额外项可能是非物理的，从而推导出定量意义上的准确结果；因为这些额外项并不遵从QED在数学上的精细要求，所以完全可以忽略。直到1949年年末，汉斯·贝特向费曼介绍了一个由沃尔夫冈·泡利发现的技巧，该技巧允许在真空极化图中引入数学上一致的改变，费曼才得以摆脱困境。

费曼将这一策略纳入计算之后，QED里的所有无穷项就都被解决了，每一个物理量可以被计算到相当高的精度，并可以与实验结果进行比较。从实用的角度来看，有这样一个可以用来计算各种过程的有限（以及准确）预测结果的电子和光子理论，费曼已经实现了在研究生阶段与惠勒共同工作时激励着自己的第一个目标。

但是费曼直觉上的疑惑并没有解开，他在1949年的著名论文《量子电动力学的时空方法》（文章概述了费曼图的技巧和结果）中添加了一个脚注，表明需要更加准确的兰姆位移的实验观测，以检验他与其他人当时计算出的由真空极化效应所带来的微小贡献是否真实。

事实证明：它们是真实的。

第10章

犹如失败的成功

我的工具来自遥远的地方。

——摘自理查德·费曼1984年与西尔万·施韦伯的对话

费曼对自己研究结果的踌躇看似令人费解，却在情理之中。实际上，这种状态并不鲜见。在科学中，正确答案在发展它们的过程中并非总是显而易见的。试探性的工作往往游走于知识边缘，伴随着许多曲折、漆黑的窄巷和死胡同。自然世界遵从了案头的数学推导，反而容易使人生疑。因此，如果我们想要了解费曼真正的科学遗产，在进入本书的第二部分之前，我们至少还需考察一些相关的事件、人物以及命运的转折，这些因素实际上支配着历史的走向，而当人们在事后试图对科学概念进行逻辑阐述时往往避之不谈。

在费曼的发现得以发展和被接受的过程中，有两个人在周围环境中起了主导作用：朱利安·施温格和弗里曼·戴森。我们此前提过朱利安·施温格这位青年才俊。和费曼一样，施温格也被当时理论物理学界最重要的基本问题所吸引，即如何将QED变成一种内在一致的大自然的理论。施温格也为战争做出了贡献，而战时的工作也对他的物理研究方法产生了深远影响。在麻省理工学院辐射实验室工作的施温格开始采用一种基于经典电动力学的工程学方法，重点关注源和响应问题。此外，施温格也如费曼一般，被自我超越的意识和内心认定要做的事情强烈地驱使着。

然而他们的相似之处仅限于此。施温格与费曼同样来自纽约，但他成长于曼哈顿，一个远离长岛的地方，他与费曼散发出了两种截然

不同的个性气质。施温格聪慧文雅，17岁时，他因帮助拉比解决了一场争论而被拉比招进哥伦比亚大学，当时拉比和他的同事在楼道里为量子力学中的一个微妙的细节而争执不下。他在21岁时获得了博士学位，并在8年之后成为哈佛大学历史上最年轻的终身教授。他表现出了高度的自信和极强的条理性。施温格喜欢脱稿讲课，但一切又似乎是精心准备过的，包括在黑板上从何处落笔，至哪里收笔——有时书写的起点和终点都不止一个，因为他可以双手并用。他的思维流动看起来非常复杂，甚至很多人会说这种复杂已经超过了必要的程度，但是这种思维流动既精确，又合乎逻辑，而且极为优雅。

与施温格不同，费曼的卓越之处则表现为一种思维上的急切。如果他对解决某一问题产生了兴趣，他会直接冲向问题的答案，然后再回头寻求对问题的理解并补充缺失的步骤。很多时候他几乎无法容忍他人在思维上的迟滞，然而跟得上他思路的人实在寥寥无几。正如他后来在回应加州理工学院的工作邀约时所言："我不喜欢提出一个问题，再建议一种解决问题的方法；对于那些直到妻子生产还不能用我建议的方法解决问题而找不到工作的学生，我不愿意为他们负责。我不会提出一个自己不知道是否可行的研究建议，而我了解一项研究是否可行的唯一办法就是事前自己尝试。俗话说，'博士论文是由教授在特殊的磨炼下完成的研究工作'，在我看来这真是至理名言。"

也许正因为如此，费曼在物理学领域的出色门生屈指可数。而与此形成鲜明对照的是，施温格在职业生涯中指导了超过150名博士研究生，其中3人后来获得了诺贝尔奖，包括两位物理学奖得主和一位生理学或医学奖得主。这样看来，施温格在物理学界拥有广泛受众是不足为奇的，特别是当他试图解决基础物理学前沿最伟大的难题时。

谢尔特岛会议之后，施温格也投身于推导以QED为基础的与相对论一致的计算结果中，其计算目标是一个与狄拉克理论低阶部分的预测不同的物理量，即电子的异常磁矩。1947年年末，施温格利用自己发展的一套用于处理QED问题的工具，以及他本人、维克托·魏斯科普

夫和汉斯·克拉默斯一直在推介的重正化思想，率先得到了问题的答案。

施温格所取得的成就立即传遍了整个物理学界。1948年1月，施温格受邀参加了美国物理学会年会，在这场物理学界的年度盛会上，施温格做了题为“量子电动力学的最新进展”的学术报告，并引起了广泛的兴趣。为了满足更多人对他的研究结果的求知欲，当天晚些时候，施温格被要求以同样的内容进行了第二次报告，随后又面对更多听众进行了第三次报告。

费曼在施温格做完报告之后站了起来，宣布他也算出了与施温格相同的物理量，而且实际上在异常磁矩的计算中得到了更普遍的结果。但是费曼尚需解释他的方法，所以同施温格的成功相比，他的声明反响有限。

费曼的思想在当时并未引起科学界多少关注，并不是因为会议缺乏此类主题，而是因为他最终解决问题的整个方法是独一无二的。费曼长期忽视了传统量子场论筑就的安全屏障，尽管他可以利用费曼图计算出非凡的结果，但在其他人看来，这些图就像是为了猜测问题答案而画出的信手涂鸦。

几个月后，在另一场由美国国家科学院资助的研讨会（被称为“波科诺会议”）上，学界对费曼的工作所持的冷淡态度尤其明显。费曼在这次会议上首次阐述了自己的方法，他以“量子电动力学的又一表述”为题的演讲被安排在施温格的演讲之后，而施温格的演讲持续了几乎一整天！尽管施温格一向镇定自如，但听众席上的玻尔、狄拉克以及其他学界巨擘总是打断报告，令施温格也不时感到慌张。

汉斯·贝特注意到，施温格的演讲中比较正式的部分受到的打断最少，于是他建议费曼在演讲时也更加正式和数学化一点儿。这就像让摇滚乐队主唱在大键琴上演奏巴赫的乐曲一样。费曼本打算演示他推导这些东西的过程，先强调成功的计算范例和结果，再倒退一步去解释这些计算和结果如何激发了他的一整套想法。然而，在贝特的建议

下，费曼强调了其时空求和方式的数学方面，而不是物理方面。结果，用费曼的话说就是：“一场毫无希望的演讲。”

狄拉克不停地打断费曼，追问他的理论是不是幺正的。如前所述，幺正性是描述在任何情况下，所有可能的物理结果的概率之和必须等于1（所有事件发生的概率和是100%）的数学术语。但是费曼未曾认真思考过这个问题，而且，由于他的粒子在时间域上可以既向前也向后移动，他只得回答他根本不知道。

紧接着，当费曼将正电子视为在时间轴上逆向运动的电子时，一位参会者询问这是否意味着在他纳入计算的某些时空路径中，几个电子可能占据相同的态——这明显违背了泡利不相容原理。费曼回答得十分肯定，因为在他所描述的情况下，不同的电子并不是真正不同的粒子，而仅是相同粒子在时间轴上正反向运动而已！费曼后来回忆说，正是这一回答令报告随即陷入了混乱。

最终，玻尔质疑了费曼时空概念的物理基础。玻尔认为时空路径的图景违背了量子力学的原理——粒子根本不会沿着特定的轨迹运动！这时，费曼打消了让与会者相信自己策略正确性的念头。

毫无疑问，玻尔错了。费曼的路径求和方法清晰地表明，在计算物理结果时必须同时考虑很多不同的轨迹。而且事实上，玻尔的儿子事后还向费曼致歉，说他的父亲误解了费曼。但这类质询显然反映出了一种深层次的怀疑和日益增长的困惑，即费曼是否发展了一个完全自洽的理论。费曼对听众们的要求太高了，诚然，听众当中的确包含了20世纪最为睿智的物理学者，但仅凭一次演讲就使人完全适应这一全新且尚待完善的思考基本过程的方式，恐怕不切实际。毕竟，费曼自己也曾花费数年时间，经历了数千页的计算，才发展出这个理论。

或许有人会觉得费曼会嫉妒施温格，尤其是考虑到人们对他们早期工作的不同反响。他们都具有竞争力，这一点毋庸置疑。但至少在费曼看来，他们当时更像是盟友。他们都不能完全理解对方的工作，但又都知道并相信对方的能力，并且都觉得他们两人的想法超越了所

有其他与会者。费曼的记忆也许有些自私，因为当时他对自己不被理解感到不满足。波科诺会议后，郁郁寡欢的费曼决定将自己的思想整理成文发表出去，以便恰当地解释自己在做怎样的工作。对于讨厌为发表而撰文的费曼而言，这次动笔的目的十分明确。

此前我们曾经提过，费曼解决物理问题的手段可以总结为“结果说明了方法”。意思就是，有人或许会想出一个不成熟的思想或者方法，但其正确性在于结果。如果计算结果经实验证明与事实相符，那么这种方法可能就是正确的，值得进一步探索。

费曼意识到自己的路径求和方法是正确的。当时费曼已经计算了在QED里所能计算的几乎全部的物理量，而他的结果与当时其他方法的结果一致。随着工作的进行，费曼为解决手头的具体问题构建了自己的方法。但是，应该怎样在论文中向那些不习惯于从结果反推过程，而是惯于从前向后理解理论的同行读者呈现自己的方法呢？

对于费曼来说，将已经足够清晰的思想呈现给其他人去理解，意味着做更多的计算。1948年的夏天，费曼不但完善了他的计算方法，而且使之更具普适性，此外他还发展了更强大的方法。费曼可能觉得，如果计算方法可以变得更加简洁和普适，与物理学同行交流计算结果就会更加容易。最终，在1949年的春天，经过了充分的前期准备，费曼终于完成了两篇具有划时代意义的论文：《正电子理论》和《量子电动力学的时空方法》，基本上总结了他的所有观点和他此前两年所进行的成功计算。

促使费曼将内心的科学信念发展成一份科学遗产的还有另外两个关键因素。第一个因素与我们曾经提过的弗里曼·戴森有关。年轻的戴森是一位杰出的数学家出身的物理学家，1947年从英国的剑桥大学来到美国，成为贝特的学生，他最终向全世界解释了费曼的方法。

在英国时，弗里曼·戴森已因其在数学方面的成就而闻名；23岁时，戴森认为当时真正有趣的智力问题存在于理论物理学领域，尤其是电磁学量子理论问题中。于是，当他还在剑桥三一学院做研究员

时，他就联系了几位物理学家，问他们应该去哪里了解最新、最令人兴奋的物理进展。所有人都告诉他应该去康奈尔大学的贝特研究组。

来康奈尔后不到一年，戴森就完成了一篇文章，在不考虑粒子自旋的简化的相对论理论模型中计算了兰姆位移的量子修正。和费曼一样，戴森对贝特充满敬意和钦佩，并受其深刻影响，而且戴森心目中的贝特与费曼心目中的贝特出奇地相似。戴森后来写道："贝特的观点是，要理解任何东西，你都需要计算出数值。对他来说，这就是物理研究的本质。"

1948年的春天，戴森正在深入研究QED的概念问题，在罗伯特·奥本海默的提醒下，戴森以及他的物理学同行们阅读了新创办的日本学术刊物《理论物理学进展》（*Progress in Theoretical Physics*）的第一期。戴森惊讶地发现，尽管处于一种完全隔离的状态，但日本的理论学家仍然在战争年代取得了显著的进展。尤其是朝永振一郎（Sin-Itiro Tomonaga），此人采用了与施温格类似的技术手段，独立地发展出了一套解决QED问题的方法。不同之处在于，朝永振一郎的方法在戴森看来要简单得多。戴森写道："朝永振一郎用一种简单明了的方式将自己的想法表达了出来，所以任何人都能理解，但施温格则没有。"

在此期间，戴森保持着与费曼的互动，通过黑板上的演算和推导了解了费曼的研究进展。这几乎是给了戴森一个绝无仅有的机会，使他得以在费曼尚未发表其工作，甚至尚未能就这一主题进行条理清晰的宣讲时理解了费曼的方法。

如果说有谁能比贝特更受戴森的钦佩，那一定是费曼。费曼的才华，加上他的干劲儿、魅力和无所畏惧的精神，无不令这位年轻人着迷。戴森很快意识到，费曼的时空方法不仅强大，而且如果这种方法是正确的，就一定有办法能揭示费曼方法与施温格和朝永振一郎所发展的方法之间的关系。

与此同时，戴森深得导师贝特的赏识，贝特建议拿着英联邦奖学金的戴森，去普林斯顿高等研究院开展研究生阶段第二年的学习，师

从奥本海默。那年夏天，在搬去新泽西州之前，戴森与费曼一同前往洛斯阿拉莫斯，踏上了那场命定的横跨美国的汽车旅行；接着，他在密歇根参加了一期暑期学校，然后又搭上了灰狗公共汽车[注]再一次横跨美国前往伯克利，最后返回。从加州（伯克利）返回的途中，在经历了48小时会让大多数人精神麻木的长途跋涉之后，戴森将精力集中于物理上，在脑海中构建了一个基本的特征框架，来证明费曼和施温格的QED方法事实上是等价的。戴森将这两种方法融合在一起，正如他在一封信中所描述的那样，用一种“施温格理论的新形式，同时结合了两者的优点”。

1948年10月，在费曼完成他在QED方面里程碑式的论文之前，戴森交出了他的著名文章《朝永振一郎、施温格和费曼的辐射理论》，证明了这三种理论的等价性。这项工作在物理学家们心理上的影响是深远的。物理学家们曾相信施温格，但施温格的方法复杂得令人望而生畏。通过证明费曼的方法同样可信、一致，并且为计算高阶量子修正提供了一种更为简单且系统化的方法，戴森向物理学界展示了一种新的、人人皆可轻松运用的有效工具。

在提交了上述有关辐射的文章之后，戴森又于1949年年初发表了另一篇开创性论文。为了计算理论中任意复杂的高阶贡献，戴森此前已经发展出了把施温格的数学形式体系用在费曼理论中的方法，随后，戴森又给自己设定了一项任务：以一种严谨的，或者至少对于物理学家而言足够严谨的方式，证明这一切都是有意义的！戴森证明，一旦最简单的自能和真空极化计算中的无穷大问题得以解决，那么在高阶项计算中就不会出现其他无穷大问题。这就完成了对理论的“可重正性”的证明，其中所有的无穷量一旦首先被费曼方法引入的数学技巧控制，就可以合并入理论中不可测量的裸质量和电荷项里。当所有项都可以用重正化的物理测量的质量和电荷表示时，所有的理论预测就会变得有限且有物理意义。

随着戴森的两篇论文的发表，QED理论的症结终于得以真正解决。至此，QED终于可以跻身于最高科学意义上的“理论”之列，作为一种逻辑上自洽的表述形式，它可以做出独特的理论预测，这些预测可以与实验结果进行比较，并已经成功地得到了证实。

有趣的是，在戴森证明施温格和费曼表述等价性的原始论文中，仅仅包含了一幅时空费曼图。然而，由于费曼关于自己研究结果的重要文章尚未发表，所以第一幅已出版的“费曼图”实际上是由戴森绘制的！

戴森的工作具有不可估量的重要性和影响力，他因此在物理学界声名鹊起。但更为重要的是，他的工作让那些不能理解费曼图，或者对费曼图方法存疑的人学会了费曼形式，并开始采用这一表述。尽管费曼本人后来在1949年和1950年发表的开创性论文中阐述了自己的工作，但戴森的两篇论文率先为世界提供了一扇窗口，使费曼得以凭借其思想改变物理学家思考基本物理问题的方式。

为了让世人相信费曼方法的有效性，戴森付出了很多的努力，甚至比费曼本人还要多。事实上，在费曼的论文发表后的10年间，物理学家对费曼图的后续使用大多可以追溯到戴森的影响。通过与费曼之间的私人接触，戴森之前已经成为费曼的头号信徒。

戴森的这些文章最终反映了他的观点，即尽管施温格、朝永振一郎和费曼的方法是等价的，但对于那些想用QED去解决物理问题的人来说，费曼的方法更富启发性，也更为实用。

当物理学界兴趣之潮开始从施温格的方法转向费曼的方向时，施温格并没有茫然不知。他在后来说道：“有些物理图景正在被到处宣扬，在某种程度上，这种传播方式颇似耶稣信徒以希腊逻辑把希伯来神介绍给外邦人。”后来他还发表了另一番恭维式的讽刺，或许更能体现他的观点，他认为只有那些甘于辛苦、知难而进的人才能受到启迪。施温格说：“恰如近年出现的硅芯片一样，费曼图把计算带给了大众。”

科学史家戴维·凯泽（David Kaiser）研究了在费曼的论文发表前后的几年中，费曼图方法在物理学界的“扩散”现象。根据凯泽的研究，费曼图方法呈现出指数型的增长，近乎每两年增加一倍。截至1955年，大约有150篇论文中包含了费曼图。这些起初只被费曼和少数康奈尔大学的同事所理解的新奇图景，经由戴森的推介，在普林斯顿高等研究院乃至更大范围内获得了同行的认可，并逐渐成为一种技术，出现在该学科最具参考价值的期刊《物理评论》的每一期里。这种以处理QED中存在的问题为初衷而发展起来的方法，现在几乎被应用于物理学的所有领域。

其实，费曼和戴森两人对于费曼图的理解也大相径庭。费曼受其自身的时空图像、路径积分表述以及他坚持对运动中的粒子而不是从量子场的思想出发进行思考等因素的影响，将费曼图视为物理过程的真实图景，其中电子会在时间（向前和向后）和空间内不停跳跃。费曼正是基于这些图像写出了公式，然后再检查这些公式是否能够得到正确的结果。这实际上是一种借助最少的假设建立一整套理论的方法，除了费曼的非凡直觉之外，几乎没有什么基本依据。

戴森的工作改变了这一切。戴森证明了费曼图可以从基于量子场论的基本方程组中推导而来。对于戴森来说，每幅费曼图的每一部分都代表了方程组中一个定义良好的项。这些图是用来阐明方程式的辅助手段，而将费曼图转换为方程式的“费曼规则”尽管是由费曼专门发明的，但可以通过与量子力学和狭义相对论相关的、定义明确的方程来证明。也许正因如此，物理学界对费曼图的采纳速度要快于其路径积分的时空方法。在后文中我们将会看到，路径积分的时空方法还要再经过几十年才能彻底改变物理学的格局。

戴森立刻意识到，费曼的方法可以帮助普通人系统地执行量子场论的复杂计算。正如他后来在回忆录中所描述的那样：“用正统理论为汉斯·贝特所做的计算，花了我几个月的时间和数百张纸。而费曼只需要在黑板上计算半个小时就能得到相同的答案。”

而直到1949年1月，在美国物理学会年会期间，费曼才恍然认识到自己已经做出了一些真正重要的发现。就在这次会议上，戴森广受赞誉，罗伯特·奥本海默在主席致辞中对戴森的工作大加肯定。当时，基本上美国所有活跃在研究领域的物理学家都会聚在纽约的一家大型酒店里，因而这场在1月举行的会议或许已经成了世界上最重要的物理学会议。1949年的这场会议弥漫着欢庆的气氛，因为“无穷大”问题的迷雾终于散去，物理学家们终于可以将电动力学理解为一个可操作的量子理论。此外，正如费曼在1948年为新期刊《今日物理》（*Physics Today*）撰写的一篇评论中所描述的那样，随着第一个有实际使用意义的粒子加速器——伯克利的184英寸回旋加速器的发展，在奇怪的强力下相互作用的海量新基本粒子正“于可控条件下大规模地”被创造出来。由这些奇妙的新现象组成的世界所带来的兴奋之情，以及用已经发展起来的处理QED问题的新方法阐明这些新现象的强烈愿望，都是显而易见的。然而，激起费曼热情的并不是对QED本身的讨论，而是对新创造的被称为“介子”的粒子相关的相互作用的争论。

一位名叫默里·斯洛特尼克（Murray Slotnick）的年轻物理学家曾尽心竭力地运用费曼的量子场论计算方法来确定，介子这种新型粒子如果作为虚粒子在核内中子与轨道电子间交换将产生何种效应。他发现只有一种可能的相互作用会产生有限值，于是他对此进行了计算。斯洛特尼克在会议期间展示了他的工作。

在斯洛特尼克的陈述之后，奥本海默站了起来，并用他惯有的方式，迅速而又尖刻地驳斥了斯洛特尼克的研究结果。奥本海默声称，高等研究院的一名博士后研究人员已经证明了一个更为普遍的定理，即所有不同的介子相互作用最终都将对中子–电子相互作用产生相同的影响，这样的结果显然与斯洛特尼克的结果不符。

费曼明显是在这段讨论之后才到场的，他在获知了新出现的争议后，受邀就谁是谁非发表看法。直到那时，费曼还没有对介子进行过任何的理论计算。但是当天晚上，在他了解了这些介子理论的含义之

后，费曼将他的QED方法迁移到了这一新的背景之下，并花了几个小时计算了各种不同的介子理论。第二天早晨，费曼将自己与斯洛特尼克的计算结果进行了比较。斯洛特尼克实际上仅在理论的一个特殊极限下进行了计算，而费曼已经在最广泛意义上进行了计算，但是当他取同样的极限时，他发现自己的结果与斯洛特尼克的结果是一致的。

费曼的结果无疑令斯洛特尼克重振了信心，但同时也令他震惊。费曼只用了一个晚上，就完成了斯洛特尼克花费了近两年的时间所进行的推导和计算！对于费曼来讲，这一现实令他喜出望外。就在那时候，费曼才意识到他所发展的新技术的真正力量。如同他后来所说："直到那时我才真的知道我拥有了一些东西。而在这一切发生之前，我并不知道我所拥有的是多么绝妙的东西。就在那一刻，我真正意识到我应该去发表自己的研究成果——我已经走在世界前端了……斯洛特尼克告诉我他花费了两年时间做到这一切的那一刻，就是我获得'诺贝尔奖'的时刻。而当我真的获奖时，其实已经无关紧要了，因为我早就知道我成功了。那真是令人兴奋的一刻。"

当奥本海默的博士后同事在第二天宣讲了论文之后，费曼忍不住公然反驳了奥本海默的观点。在那个名叫凯斯的博士后研究人员做完报告之后，费曼站起来毫不客气地说凯斯一定是错的，因为此时费曼确认，斯洛特尼克的工作是"一个简单的计算就可以证明其正确性"的。

这一事件不仅助燃了费曼发表文章的欲望之火，而且迫使他开发一套工具，使他展现其工作的方式都能被物理学界其他同行理解。首先，费曼感觉有义务去理解凯斯在哪一步算错了。但是要做到这一点，费曼必须准确地理解凯斯做了什么，这对他来说有点儿困难，因为凯斯使用了此前被费曼完全忽视的传统量子场论的方法。于是，费曼向康奈尔大学的一位研究生讨教了这些方法，在学习的过程中，费曼不仅发现了凯斯的错误，而且他的时间投入为他带来了额外的收获：他终于能够以早前回避的方法去理解真空过程了。费曼的新理解

在其第一篇划时代的关于QED的文章《正电子理论》中起到了至关重要的作用。

接下来，随着费曼对风行一时的介子理论认识程度的加深，他能够用自己的图示规则来表述这些理论，并快速重现其他物理学家花费几年才能得到的结果。在他的下一篇经典论文《量子电动力学的时空方法》中，费曼对这些结果进行了总结。毫无疑问，这篇文章在努力理解这些新的强相互作用粒子的物理学家中间引起了广泛关注。

在波科诺会议上的失败陈述使费曼受到了鞭策，他决定先清晰地呈现用于计算的图示方法，然后再发表其正式的数学形式。费曼意识到自己的时空方法“与其他物理学家的距离太过遥远”，因此他在论文引言中写道：“根据狄拉克方程和‘（电子）对’产生现象的需要，我们对拉格朗日量进行了修改。在对空穴理论进行重新阐释以后，这种修改变得更加容易。最终对于实际的计算来讲，我们用幂级数展开表达式……很明显，幂级数的每一项都有一个简单的物理解释。由于结果比推导过程更容易理解，所以我们认为，在这篇文章中先发表结果部分更为合适。”

在第一篇论文中，费曼最大限度地弱化了对理论动机和数学动机的阐述，尽管他意识到这样做不能“在推导过程中让读者确认理论的真实性”，然而他让读者清楚地知道了自己方法的显著优势。费曼将自己用于处理相对论狄拉克理论的时空方法与更为传统的处理非相对论薛定谔理论的“哈密顿”方法进行比较，他写道：“进一步来说，相对论不变性是不证自明的。哈密顿形式的方程是基于现在的瞬间去演化未来。但是对于在相对运动中的不同观察者们而言，现在的瞬间是不同的，并且对应了时空中不同的三维剖面……放弃哈密顿方法，相对论与量子力学的结合就能自然而然地实现。”

在接下来的一年里，费曼完成了另外两篇论文。他在文章中使用了他所发展的新型微积分，对他的结果进行了完整的、更为正式的推导，并在形式上证明他的技术与传统量子场论的等价性。随着费曼这4

篇论文的发表，QED的故事到此已基本完结。当费曼还是一名研究生时，他的研究初衷是以没有无穷项的形式重新表述QED理论；而现在，他已经发展出一套用于解决无穷量问题的精确且极为有效的方法，并可获得与实验数据相符合的结果。

费曼也感受到了理想和现实间的差距。费曼意识到了这4篇论文所代表的成就，但与此同时，他也传达出一种明显的失望感。例如，在《时空方法》一文中，当费曼将自己的计算方法与施温格的方法进行比较时，他写道：“尽管这两种方法在极限的情况下是一致的，但它们在理论上都不完全令人满意。无论如何，现在看来我们有了一种完整而明确的方法来计算量子电动力学中任意阶的物理过程。”

此后多年，一直到1965年费曼因自己的工作而获得诺贝尔奖之时，他始终感觉自己的方法仅仅是可用，而并不深刻。他并没有揭示出自然界中新的基本性质，以摆脱无穷大理论，而仅仅是发现了一个能安全地处理掉它们的方法。他内心真正希望的是路径积分能为我们对自然界的基本理解带来启示，并且这些启示可以消除相对论量子物理学的弊端，但他感到这一目标仍然没有实现。正如他在诺贝尔奖揭晓当天对一家学生报社所说的：“我在1949年发表论文的目的是让这些简化的计算方法更容易被人们使用，因为我仍然觉得我没有解决任何真正的问题……我期望有一天我能实现我的初衷……得到有限解，解决自发辐射问题，将真空极化的问题理清楚……而这些我都没做到。”后来他又在诺贝尔奖致辞中说道：“这就是我的量子电动力学时空观的完整发展历程。我不知道人们是否能从中得到些什么，对此我表示怀疑。”

历史终将证明，费曼过谦了。

---

1. 灰狗公共汽车（Greyhound bus），是美国跨城市的长途客运汽车。——译者注

第二部分

对宇宙真理的终极探索

时至今日，我们仍看不出薛定谔方程中是否包括青蛙、作曲家或者道德。我们也不能断定，是否需要像“上帝”这样的事物凌驾于薛定谔方程之上。因此我们对每一种观点都可以坚守己见。

——理查德·费曼

第11章

心中之物与物质之心

我倾力去做的事情，是把一种半视觉化的思想图像清晰明确地表达出来。

——理查德·费曼

理查德·费曼并没有在1949年解甲投戈。他已经取得了一些令人瞩目的成就，尽管他本人并没有认识到这些成就的全部价值。与此同时，自然界一直在召唤着他。费曼对物理学的兴趣不仅局限于某个令人兴奋的前沿领域，事实上，他对物理世界的各个方面都怀有强烈的好奇心。在完成量子电动力学方面的代表性工作的同时，费曼也经历了在个人意义上更重要，也更加艰难的转变：离开挚爱的康奈尔大学，迎接更具异国情调的诱惑和刺激。

尽管费曼的行为举止，以及他应对社会习俗的方式都十分与众不同（我已经提过，费曼早年对古典音乐和艺术毫无兴趣），然而在战后的几年里，他的生活却出奇地保守。就他的战时经历以及他与各国同事间的相处来看，他或许应该深谙世故，但直到31岁他还没有离开过美国本土。不过很快，这一情形就会发生改变。

费曼总是在寻找新的问题和新的智力挑战，这一思维偏好在他的个人生活中也有所体现。他曾对我说：“人们应该尽其所能地寻找新的冒险。”

我猜想，经过1946年到1950年在量子电动力学方面的密集投入和产出，费曼此时大概想要远离原来的一切，想要彻头彻尾、由内而外地改变自己的生活。情绪上的不安定和不快乐，以及对冒险的渴望，

使得费曼想要逃离寒冷阴郁的伊萨卡（也许他也很想离开自己卷入的众多激烈的情爱纠葛）。阳光明媚的加利福尼亚在向他招手，然而南美洲看上去更加迷人。

和生命中的许多关键性决定一样，这一选择也裹挟着几丝机缘巧合。当时，费曼在洛斯阿拉莫斯的一位老同事罗伯特·巴彻（Robert Bacher）正准备前往帕萨迪纳，重启加州理工学院的一个暂停的物理学项目，而他立刻就想到并联系了费曼。这通电话打得正是时候，早先已经拒绝了普林斯顿大学、芝加哥大学、加州大学伯克利分校以及众多其他科研机构的费曼同意去帕萨迪纳。与此同时，费曼在遐想更远的地方。出于某种原因，他决定前往南美。1949年夏天，当一位来访的巴西物理学家邀请费曼去巴西访问时，本已开始学习西班牙语的费曼爽快地答应了这次邀请，办理了护照，并转而学习葡萄牙语。

他到位于里约热内卢的巴西物理研究中心讲授物理学方面的课程，并于当年秋天返回了伊萨卡。在巴西的这段经历让费曼对葡萄牙语和巴西的风土人情更加谙熟。这都要归功于一位科帕卡瓦纳美人——一位名叫克洛蒂尔德的姑娘，费曼还说服她陪自己回美国小住了一段时间。伊萨卡的冬天使费曼去意已决，而加州理工学院不仅气候宜人，更有康奈尔这样的文科大学所没有的魅力。用他自己的话说：“学校里有众多人文学科本可以提供广阔的理论视野，但这些学科的研究者却普遍愚钝。”他接受了加州理工学院的工作邀请，并谈妥了一份对他而言非常优厚的合同。他可以立刻开始为期一年的学术休假，回到他热爱的巴西。在那里，他一边研究物理，一边在科帕卡瓦纳的海滨游泳，并享受晚间的娱乐，这都要感谢加州理工学院和美国国务院的支持。

他在这一时期的主要关注点是新发现的介子，以及它们在核物理领域引起的混乱。费曼通过业余无线电设备和信件与他的美国同事联系，询问相关问题或者提出建议。费米曾经斥责他道：“我希望自己也能一边在科帕卡瓦纳的海滨游泳，一边更新自己的想法。”

然而费曼也十分重视自己的使命：帮助巴西的物理学重现活力。在巴西物理学研究中心授课时，费曼指责巴西当局只教会了学生如何记忆名称和公式，却没有思考物理学习的本质。他抱怨学生们只是在学习如何用一些概念去解释另一些概念，却完全不理解自己在学习什么，而且对于他们本应该学习的真实物理现象毫无感觉。在费曼看来，“理解”意味着一个人能够掌握自己的知识，并且举一反三。

在巴西那种相对隔离的状态下，即使费曼才智过人，他也无法跟上当时研究领域的前沿。他能够独立地再现既有的结果，却没能推进粒子物理学新兴领域的发展。取而代之的是，他经历了一场文化启蒙和情爱盛宴。

先来说说音乐。费曼自称是音盲，但他无疑有着与生俱来的节奏感，能把握各式各样的节奏。与他亲近的人都知道，工作中的费曼总是用手指在纸面、墙壁以及任何方便的地方不停地敲击。在里约，费曼找到了与其灵魂完美契合的音乐形式——桑巴，这是一种拉美与非洲传统音乐整合而成的热力四射、律动十足又质朴无华的产物。他进了一所桑巴学校，开始在桑巴乐队里打鼓，甚至因此获得了报酬！最盛大的桑巴表演出现在一年一度的狂欢节，在这场纵情声色的街头庆典上，费曼可以肆意狂饮，而他也是这样做的。（写到这里的时候，我正坐在宾馆房间里凝望着科帕卡瓦纳海滩——纯属偶然。）

费曼被里约的魅力吸引，这不难理解。这城市美得惊人，环抱于绮丽多姿的山海之间，卡里奥克舞使这里充满生机。当地人忙着聚会、辩论、踢足球，以及在沙滩上调情。形形色色的人类活动似乎永无止息。这里乌烟瘴气，热辣性感，令人惊惶，却又令人轻松惬意。在这里，费曼可以逃离大学城的樊笼，彻底摆脱同事和学生，并与热情、和气、易于相处的巴西人打成一片。他毫不掩藏的澎湃热忱，想必也感染了身边的每一个人——物理学家、里约本地人，当然包括女人。

费曼住在科帕卡瓦纳海滩上的米拉马尔皇宫酒店，在那里，空虚失意的费曼坠入了无节制的狂饮（直到他吓得发誓永远戒酒）和泛滥的情欲。他在海滩和俱乐部猎艳，也在酒店的庭院酒吧物色女伴——这里靠近科帕卡瓦纳各项盛事的举办场所，至今仍是人们争相落座的绝佳位置。他曾一度将目标锁定于下榻酒店的空姐，而就像他到处宣扬的那样，他喜欢以智力征服他在酒吧里遇到的当地女人。其中一位不仅被他哄上了床，甚至偿还了费曼在酒吧为她支付的饭钱。

与陌生人的床笫之欢往往别有一番情趣，但对于寂寞而言，这种排解方式无异于饮鸩止渴。费曼接下来的一个荒谬至极的反常之举，盖因如此。他写信向一位认识且约会过的伊萨卡女子求了婚。这名女子是如此独一无二，与他自己也截然不同，或许在费曼看来，她正是可与自己互补的最佳伴侣。

费曼的许多前任女友都意识到，那些表面上的两情相悦，有时只是她们的一厢情愿。和女人相处时，费曼的专心令人痴迷。与此同时，虽然其肉体可能表现得很投入，其思想却是与之抽离的。玛丽·路易丝·贝尔（Mary Louise Bell）对此显然没有察觉，从伊萨卡到帕萨迪纳，她一直在追求费曼。这位爱穿高跟鞋和紧身衣的浅金色头发的女郎原本以为，费曼有着更为光鲜的外表和更高的艺术品位，且不爱和众多科学家混在一起，她可以和费曼一起筑造她心目中的理想生活。

两人于1952年结婚。尽管在一些人看来，已有迹象表明，他们的婚姻注定不会长久，然而人心不似物理，谁都无法用实实在在的规则对人心之所想做出准确的判断。不过，在离婚诉讼中提到的一件事很能说明问题。她说："他一醒来就开始研究微积分。开车、坐在客厅里，甚至夜里躺在床上的时候都在研究微积分。"

在为期一年的恣意狂欢后，费曼结束了巴西之旅，夫妇二人在帕萨迪纳安顿了下来。然而家庭生活的喜悦逐渐演变为一种不为人知的折磨，婚后没几年，他便怀疑自己不仅选错了伴侣，而且选错了定居之地。他甚至写信给汉斯·贝特，同他商讨重返康奈尔一事。不过，与

玛丽·路易丝相比，加州理工的魅力更难以抗拒。1956年，也就是他们结婚4年后，费曼与玛丽·路易丝分道扬镳，而他留在了帕萨迪纳。

费曼新加入的这所大学迅速成长为位于东部的他的母校——麻省理工学院的竞争对手。加州理工学院在天体物理学、生物化学以及遗传学等一系列领域的实验与理论研究日益突出，再加上其工程学院的实践倾向，这里似乎成了一所体系完美的机构。事实确实如此，而费曼将在这里度过余生。

就在费曼的个人生活遭逢剧变之时，物理学领域也经历了一段动荡时期。在新建造的粒子加速器中，新发现的基本粒子（介子等）种类激增。基本粒子物理的“动物园”注 变得拥挤不堪，以至于物理学家分不清图表记录仪上的新光点和气泡室中的新轨迹中，哪些能真正代表新的基本粒子，而哪些仅仅是现有粒子的重新排列。

早在介子理论发展之初，费曼在完善他对量子电动力学的理解时就涉足了这一领域，但他也敏锐而清醒地洞察到，他新发展的“画图法”并不适用于手头的工作。许多实验都具有不确定性，而且粒子之间的相互作用普遍很强，因此使用“费曼图”来系统性地计算整个过程中的小的量子修正似乎并不合适。在他从巴西写给恩里科·费米的信中，他说：“不要相信介子理论中使用费曼图所进行的任何计算！”在另一个场合提及介子物理领域时，他又指出：“可能就没有足够的线索能让人类的头脑弄明白这一理论的实际情形。”

我怀疑在费曼看来，当时的物理学界尚未做好对介子实验的相关结果进行解释的准备，而他希望开辟一个新的思考方向，不过分受制于量子世界错综复杂的数学细节，而更多地尝试直接推测物理结果。他想要去思考一些他能够感知并掌控，而非仅浮现于脑海中的事物。因此，进入加州理工学院后不久，费曼的研究转向了另一个物理学领域中的一个全新问题。他开始探索极低温条件下（而不是极小尺度下）的量子世界。

从19世纪末到20世纪初，荷兰物理学家卡默林·昂内斯（Kamerling Onnes）将他整个职业生涯都奉献给了低温物理学研究，将体系的温度逐步冷却至接近绝对零度（在此温度下，按照经典的解释，至少所有的原子内部运动都将停止）。1911年，他有了一个奇迹般的发现：在比绝对零度高4度的条件下（昂内斯最终得到了绝对零度以上1度以内的温度，达到了当时地球上所能达到的最低温），他见证了水银的神奇转变：水银中的电流突然可以完全没有阻力地流动。

基于温度降低时电阻也会有所降低这一简单的观察结论，人们推测在极低的温度下电阻也会下降。昂内斯本人的推断是，在绝对零度时，电阻会降为零，但这一温度永远无法在实验室里直接获得。然而，他所获得的惊人实验结果却是，在特定而非零的低温条件下，电阻突然降为零。在此状态下，一股电流一旦开始运动，就会永不停歇。昂内斯发现了这一现象，并称之为“超导性”（superconductivity）。

有趣的是，两年之后昂内斯并不是因这一发现而直接获得诺贝尔奖，而是由于他“对低温条件下物质特性的一系列一般性研究成果，尤其是液氦的制造”而获奖。这一表彰显示出了诺贝尔奖委员会非同寻常的先见之明（实际上是运气好），因为还没有人能在1913年就推断出，液氦本身具有能够与水银和其他金属的低温导电性相媲美的迷人性质。1938年人们发现，液氦被充分冷却后会表现出“超流性”（superfluidity），表面看起来比超导性更加奇特。而同样值得注意的是，昂内斯很可能将液氦冷却到了变为超流体的温度，但是并没有对这一更为奇特的显著现象提出自己的看法。

在超流态下，液氦可以毫无摩擦地流动。将超流液氦装入一个容器，它会自发地以薄膜形式在容器的边上流动，无论缝隙多小，超流液氦都能穿过。超导性的奇妙之处隐藏在对电阻和电流的测量结果背后，与之不同的是，超流性的存在是肉眼即可充分领略的。

直至20世纪50年代初，科学界仍然未能从微观原子理论的角度解释这两个奇妙的现象。如同费曼所言，它们就像“两座被围攻的城市……被知识包围，却仍然坚不可摧”。与此同时，费曼也为低温下自然界所展现出的所有奇妙的新现象所倾倒，他说：“我猜实验物理学家一定常以欣羡的眼光看待像卡默林·昂内斯这样的人，因为他发现了像低温这样的研究领域，而这一领域似乎深不见底，人们可以在其中不断探索下去。”所有这些现象都令费曼着迷，他将自己的注意力主要放在了揭示液氦的奥秘上；而与此同时，尽管他继续努力地探究，却最终未能成功揭示超导性的由来。

在当时，这个最终被称为“凝聚态物理学”的研究领域还很不起眼，但费曼戏剧性地转向了这一领域，其深远意义是不可估量的。尽管超导性和超流性的问题还没有被解决，但已经有一些最杰出的物理学家投身于这一领域，并已在这些问题上进行了一番探索。

然而，费曼清醒地认识到，这一领域需要一种全新的方法，而且在他所有的研究工作中，这一成就或许最好地展现了他非凡的物理学直觉与卓越的数学才能的结合，这种结合使他可以绕过此前存在的理解障碍而不必设法将其破除。他最终推导出的物理学图景实现了他在理解超流性方面的所有目标，而且事后看来，这一方法极其简单，简单到令人怀疑为何之前没有人想到它。但这正是费曼的工作所具有的特征：事先一切都深陷迷雾，晦暗不清；待他指明路径，一切又仿佛那么清晰，几乎一目了然。

除了他对物理学有趣现象的着迷，人们或许会想要了解，液氦这一特定问题，乃至量子力学在材料性质方面的一般应用是因何吸引了费曼的注意力。我猜测，其动力仍然来自他早期为了解新发现的强相互作用的基本粒子（介子）的性质所付出的努力。尽管他意识到费曼图似乎无法解开与加速器中新出现的大量强相互作用的粒子相关的令人极为困惑的实验谜团，但他依旧对其他强相互作用系统感兴趣，想探索其他物理学方法来理解支配这类系统的物理学原理。

致密物质中电子和原子的性质刚好为费曼提供了一个类似的问题，这一领域的实验情形更加清晰，而理论景观则略显稀疏。事实上，在费曼开始研究这一问题之前，尚没有人尝试过在微观尺度下使用量子力学直接推导出液氦从正常状态向超流状态转变的一般性质。

量子力学在超流性研究中所发挥的关键作用，从一开始就显而易见。首先，超流态物质不会耗散或损失能量，而自然界中已知的唯一具有类似行为的系统是原子。根据经典的电磁学定律，电子绕质子做轨道运动时会以辐射的形式散失能量，这样电子就会快速地以螺旋轨迹坠入原子核。然而尼尔斯·玻尔假设（这一假设最终被埃尔温·薛定谔用他的波动方程所证实），电子能够存在于稳定的能级上，而且在此能级上电子的性质将保持不变，不会发生能量的耗散。

对于单个的电子和原子而言，这些理论已经足够了；但是像可见量的液氦这样的整个宏观系统能以单个量子态存在吗？这里就要提到量子力学的另一个重要特性了。经典理论认为，在绝对零度的条件下，所有运动都将停止，在标准的液体、气体甚至固体当中，使原子振动或互相碰撞的热能将会消失。此外，假设分开的氦原子间存在一些小的残余的相互吸引力（正是这种相互吸引力使液氦以液体形式存在，不会分解为单个原子组成的气体），那么在绝对零度或绝对零度附近，液氦理应凝固成刚性固体，而原子会因彼此间的相互吸引力而固定在各自位置上，且没有热能促使它们移动。

然而，事实并非如此。即使昂内斯把氦的温度降到了人们所能得到的最低温，即远低于1开尔文（绝对零度以上1度），氦也没有凝固。导致这一现象的“罪魁祸首”仍然是量子力学。在任何量子系统中，即使是最低能量态也都有非零的能量值，这与量子涨落有关。因此，即使在绝对零度，氦原子仍然会往复摇晃。氦很轻，同时，氦原子间的相互吸引力非常小，这样原子的量子基态能量足以使它们克服这种吸引力，并四处移动，形成液态，而不会被固定在晶格中而形成固态。更轻一些的氢原子理论上也会呈现出类似的现象，但氢原子间

的相互吸引力要强得多，因此它们在低温下的基态能量不足以打破固体中的化学键，氢也会凝固成固体。

所以，氦成了唯一可以在低温条件下保持液态的元素，其独特之处源于它固有的量子力学属性。因此，氦在绝对零度以上2度左右的条件下从普通液体转变为超流体也是由量子力学支配的。

早在1938年，物理学家弗里茨·伦敦（Fritz London）就曾提出，向超流态的转变可能是爱因斯坦和印度物理学家萨蒂延德拉·玻色对玻色子（自旋值为整数的粒子）组成的理想气体的预言在宏观层面的一个例子。前文曾经提到，费米子受制于泡利不相容原理，不能在同一时刻处于相同状态，玻色子的表现恰与此相反。根据玻色和爱因斯坦的预测，在足够低的温度下，玻色子气体将凝聚为单一的宏观量子态，其中所有的粒子都处于完全相同的量子态，它们的宏观组态将表现为一个量子物体而非经典物体。（在量子系统中，不同概率振幅间会发生精确相消，形成奇特的量子相干性，并造就了量子世界的许多奇观。但在一个经典物体中，所有单个粒子的概率振幅都与其周围粒子完全无关，因此，粒子间的所有奇特的量子相互作用都消失了。）

然而问题在于，所谓的“玻色–爱因斯坦凝聚”是在理想气体条件下推导出的现象，在这一条件下单个粒子之间不存在相互作用。而实际上，当相隔一段距离时，氦原子之间具有弱吸引力；距离很近时，又具有强烈的排斥力。这样一个系统仍然可能具有类似“玻色–爱因斯坦凝聚”的转变吗？这是费曼感兴趣的问题之一。

他不仅对此感兴趣，并且此前已经发展出了一套能够用来直观理解量子力学效应的工具。他相信，他将量子力学重塑为路径求和的方法（每一路径的权重由它的作用量来决定），为描绘主宰低温下液氦行为的微观现象提供了完美的框架。

当费曼开始考虑量子液体中每个粒子的路径总和时，有两个关键因素指引了他。第一个关键因素是，由于氦原子是玻色子，量子力学振幅所描述的原子组态与每一个玻色子所处的位置无关，任何两个氦

原子交换位置，都不会改变原有的组态。这意味着在路径积分中占主要地位的路径（作用量最小的路径）中，每个粒子都返回到初始位置的路径，应该与所有粒子的最终位置与初始组态相同，只是一些粒子之间进行了位置交换的路径相同。从表面上看，这似乎只是一个无关物理的数学小手段，但事实证明，它对物理学产生了深远的影响。

第二个关键因素是与所有相邻原子背景下任意一个氦原子的运动相关联的作用量。如前所述，经典作用量指的是一条路径上所有点的动能与势能之差的和。费曼认为，任何一个氦原子，在它以一定的速度从一处移动到另一处的过程中，只要与它相邻的氦原子将位置简单地重排，以便为它的运动腾出空间，那么，它总是能够在不接近其他氦原子（接近其他氦原子会让它们受到巨大的排斥能作用，从而增加路径的作用量）的条件下，到达任何一个点。如果该原子移动缓慢，那么相邻原子也只需要缓慢移动来让出位置。在移开让出位置的过程中，这些氦原子将获得对作用量有贡献的动能，但它们的动能将取决于第一个氦原子的速度，从而也取决于该原子的动能。

费曼认为，这一过程的净效果只是改变了我们通常所认为的氦原子的质量。这是因为当一个氦原子移动时，不止一个氦原子将不得不随着它的移动而让出位置，从而使作用量最小化。此外，一切都将保持不变。

最终，费曼证明，路径总和贡献最多的轨迹，即作用量最小的轨迹，将是那些内部的每个粒子都像自由粒子般运动，只是质量略微增加的轨迹。原本存在于小距离上的原子间强烈的相互排斥作用，完全可用这一效应来描述，因而相当于可以忽略。而如果粒子的运动类似于自由粒子，那么“玻色–爱因斯坦”理想气体将是一个很好的模型，因此对于液氦而言，玻色–爱因斯坦转变是完全可能存在的！

能够从计算量子力学行为的角度，来证实强相互作用的粒子仍然能够表现得如自由粒子一般，这对费曼来说具有超乎液氦的重要意义。正如他在此领域的第一篇论文中所阐述的：“这一原理或许可以用

于物理学的其他分支，例如核物理学。一个令人困惑的事实是，尽管存在强相互作用，单个核子却经常表现得像是独立的粒子一样。我们对于氦的论证也适用于这种情况。”很明显，费曼深为这种现象所打动。接下来我们将会看到，在此后大约20年的时间里，他的工作是如何一次又一次回到完全相同的这一情形——应该发生强烈相互作用的对象，却表现得仿如独立的个体。

除核子（质子和中子）之外，尝试理解新出现的强相互作用的介子又再度燃起了费曼的兴趣，而费曼图似乎不足以解决这一问题。如果他能利用自己的物理学直觉，结合关于液氦的丰富的实验信息，来测试理解强相互作用系统的新方法，那么他或许可以将新方法应用于介子研究。他在1954年完成的论文里阐述了类似的观点。这篇文章不涉及氦本身，而是探索了因慢电子的存在而被极化的材料中慢电子的运动，这是他使用时空路径积分的方法解决物理问题的又一次尝试。再次援引他的话：“除其固有趣味之外，这一问题也可以看作当微扰理论不足以解释时，对传统介子理论中所出现的那些问题的一种非常简单的类比。”在将近10年后的另一篇文章中，他又写道：“作为固体中的一种现象，它是十分有趣的，但是它具有更普遍的意义，因为它是粒子与场发生相互作用的最简单的例子之一。它在很多角度上都与一个核子和一个介子场相互作用的问题类似……正是这个问题的强耦合性引来了更多的关注。”

很显然，费曼陶醉于物理学的统一性，即理解物理学宇宙中一个领域的现象所用到的理论方法，也适用于理解另一个遥远领域的现象。但多年来他不断地提到介子与核子，表明他总是被由基本粒子组成的新兴亚原子世界的奥秘和其中奇特的新的相互作用所吸引。用不了多久，他就将回到那个世界，但是他尚未解决为自己设定的问题，即解释超流性，并进而摘取解释超导性的“圣杯”。将一个由自己提出却尚未解决的问题悬置起来，绝非他的本性。这一问题的解决将有助于改变我们对材料中量子行为的理解方式。

1. 粒子物理学家用“粒子动物园”来表示当时已知的多种多样的基本粒子，以动物园中物种的多样性作为类比。——译者注

第12章

重置宇宙

> 抵抗是徒劳的。
>
> ——出自《星际迷航：下一代》中博格人对皮卡德舰长说的话

费曼解释了为什么可以将液氦转变为超流体的过程理解为类似玻色–爱因斯坦凝聚（所有原子凝聚成单个宏观可见的量子态）的现象。然而，问题并未就此解决。对我们来说，这个世界貌似与量子力学毫不相关，因为在原子级别上产生所有奇特现象的神秘的量子力学相干性，会因为与环境的相互作用而被迅速破坏。随着体系的增大，这种相互作用（包括多种组成成分间正在发生的内部相互作用）的数目和种类也会增加，量子相干性会在微观时间尺度上迅速消失。因此，简单地凝聚成一个宏观量子态只是事情的一个方面。为什么最小的扰动不会破坏这一状态呢？是什么使超流氦得以保持超流状态呢？

在费曼开始研究这一问题之前，人们对此问题的解释一直是唯象的。换言之，由于实验清楚地证实了超流性的存在，人们可以从实验结果中归纳出这个系统的一般行为，进而推断出重现这些实验结果所需的系统的微观物理学性质。这听起来似乎是一个完整的物理学解释，然而事实并非如此。通过实验来归纳出微观物理学性质并不同于解释自然界何以产生这些性质，而后者才是费曼为自己制定且在很大程度上已经实现的目标。

在这一问题上，列夫·朗道（Lev Landau）给出了正确的唯象模型。朗道凭借着独特的人格魅力和与费曼相似的广泛兴趣而在苏联物理学界占据了重要席位，费曼也非常尊敬他。实际上，当1955年苏联

科学院邀请费曼去参加一个会议时，与朗道会面正是令费曼欣然应允的原因之一。然而，不幸的是，鉴于冷战的紧张局势，美国国务院建议费曼不要前往，而他也接受了这一建议。

费曼思索的核心问题似乎总是离不开粒子物理，而朗道则不同，他关注的重点一直集中于材料物理，这也是费曼彼时正在关注的领域。朗道认为，超流状态得以持续存在，意味着低温时在相干的"玻色–爱因斯坦凝聚态"附近不存在其他可以占据的低能量态（如果存在其他态的话，微小的扰动就会使量子液体进入这些态）。普通的液体具有流动阻力（黏度），因为单个原子和分子在撞击流体中的其他原子、分子、其他杂质或容器壁时会发生反弹。这些内部激发只改变了单个原子的运动状态，但是它们会使流体中的能量在容器中耗散，因而减缓了流体的流动。然而对于单个粒子而言，如果没有新的可以占据的独立量子力学态可令其进入，那么这些粒子的运动状态就不会因任何碰撞而改变。所以，超流体将持续而统一地移动，就像一个电子持续地绕着原子运动而不耗散任何能量一样。

费曼希望在量子力学第一性原理的基础上，应用他的路径积分图来证明朗道猜想的正确性。在此，他利用了我们此前描述过的一个重要事实，即氦原子是玻色子，这意味着，在一个包含了N个氦原子的体系中，如果任何一组原子仅仅是互换了位置，那么描述整个体系处于某个态的量子力学振幅将保持不变。

正如我之前提到的那样，费曼的论证只是貌似简单。他认为由于氦原子间的短距离排斥作用，处于最低能量基态的液氦将会具有大致均匀的密度。他认为每个原子都处在由其周围所有原子的位置而限定的"笼子"里，如果原子之间离得太近，原子间便会产生排斥力。如果液体在某处的密度更高，则意味着包围某一个原子的"笼子"更小，从而将这个原子限制在了更小的空间内。但是海森堡不确定性原理告诉我们，将原子限制在一个更小的空间内会使它的能量增加。因此，当

所有的原子都尽可能地远离与其相邻的原子时，液体具有近似均匀的密度，整个系统的能量最低。

一个总是存在的低能量态包含了波长很长的声波。声波是密度波，这意味着密度在液体中变化缓慢，而抵抗压缩的原子力像小弹簧一样，导致额外的密度以一定速度传导，从而定义了穿过液体的声音的速度。由于它们的波长很长，所以密度的变化非常平缓，这些声波的能量消耗非常少。它们不会改变液体的性质，而且更重要的是，液体的流动也不会受到影响。

但我们还是要问，为什么液体中不会有其他低能量态存在呢?

别忘了，量子力学表明所有的粒子都可以被视为概率波，其中波的振幅与在不同位置发现粒子的概率相关。但是，它们被叫作“波函数”是有理由的。在量子力学中，波的一个基本特征是与波相对应的能量取决于它的波长。在一个小区域内剧烈起伏的波函数具有的能量比其他波函数更高。

事实上，其中的缘由与海森堡不确定性原理关系密切。如果一个波函数在很短的距离内从高值变为低值，我们就可以在一个很小的范围内定位这个波函数所描述的粒子。但是这也就意味着这个粒子的动量以及与其对应的能量的不确定性是很大的。

因此，找到一个低能量子态的关键是找到一个不含有大量近距离剧烈起伏的波函数。现在，如我先前所描述的，波长较长的声波并不足以破坏超流动性，因此我们必须考虑其他可能性。费曼认为，我们可以从基态组态入手，构造出一个具有均匀的密度又与基态不同的态，不管它是什么样的。但是这个态必须覆盖很广的距离，这样波函数的任何起伏都不会被限定在小空间内。我们可以设想通过将单个原子A移动到距离很远的新位置B来达成这一目的。但是如果新的组态也是密度均匀的，那么其他原子就必须重新排列，让另外一个原子移动过来填充先前原子的位置。

现在，将原子移动了很长一段距离后，我们可能认为这一状态与之前的状态在长距离上存在着显著差异，因为粒子A的位置已经变了。然而费曼指出，所有的氦原子都是相同的粒子，并且都是玻色子。即使位移很大，由于最终的结果只是全同玻色子在（一个系统）内部的简单互换，所以这并不能代表一个新的量子组态。

对这个例子稍做思考，你就会意识到，无论我们令一个粒子移动多远，只要粒子的位移大于相邻粒子间平均距离的一半，这种位移就永远无法通过新的系统波函数体现出来。任何更大距离的移动都可以被一组全同氦原子的内部互换替代，这些互换根本不会给波函数带来改变。

这意味着能用波函数描述的系统新状态的最大额外扰动不能大于平均原子间距。但是这种尺度或更小尺度的扰动对应的激发能则相对较高，远高于观察到超流性的低温下能够随机产生的热振动。

因此，费曼通过这一精巧的物理学推理证明，玻色子的统计学特性直接表明了基态之上并不存在通过原子的运动就可以简单到达的低能量激发态（这种激发态会阻碍液体的流动）。只要系统可获得的热能小于基态和最低能量激发态之差，超流体就不会离开基态。

当然，费曼并未止步于此。利用他的路径积分形式，通过应用对波函数的所有合理猜测并计算最低的能量态，他估算出了被朗道称之为“旋子”（roton）的激发态的能量。这些近似值比较粗糙，且最初与现有数据无法匹配，但在接下来的10年中，他改善了分析方法，并做出了与数据一致的预测。

在费曼开始研究液氦之前，物理学家拉斯洛·蒂饶（László Tizsa，我后来认识了他，但只知道他是一位和蔼可亲的麻省理工学院退休教授）提出了他称之为“双流体”的模型，来描述液氦在超流体到普通液体之间的转变过程。朗道后来拓展了这一想法，他设想在绝对零度，所有的液氦都会处于超流体状态。当温度逐渐升高时，流体被加热，会产生出一些激发态的粒子，并在背景超流体中到处移动，但它们会

因为与容器壁之间的碰撞而散失能量，这种行为类似于普通流体中的组分。随着整个系统进一步被加热，会产生更多的激发态，直到整个液体都变为普通流体。

费曼基于第一性原理的定量预测再次得出了物理学的一般图景，但是直到32年之后，物理学家才通过足够精细的计算获得了与已有数据相一致的结果。1985年，在使用超级计算机来执行精细的路径积分计算（费曼之前进行过粗略的估算）之后，物理学家们得以证实这个方法计算出的结果，与液氦从普通流体到超流相之间发生转变过程中的细节变化十分吻合。

不过，最令人震惊的或许是费曼如变戏法般自其袖笼中掏出了对以下问题的物理解答：快速搅拌一桶超流体氦，会发生什么？和许多物理学问题一样，乍一看这似乎并不是一个亟待解决的问题，但仔细思考能带来出乎意料的重要发现。费曼指出，由于基态的性质和基态之上的激发态所需的能量，超流体状态应是“无旋的”，这意味着超流体不会形成阻碍流体流动的旋涡。但是如果我们旋转装着流体的容器，以使整个流体旋转，会发生什么呢？费曼找到了解决这一问题的关键，而他不知道的是，此时诺贝尔奖得主、挪威裔美国化学家拉斯·昂萨格（Lars Onsager）也提出了一个相似的解决方案。量子力学规律再次发挥了关键作用。

让我们回想一下，尼尔斯·玻尔假定电子在围绕原子运行时，只能处于特定的能级，由此掀开了量子革命的序幕。能量因此被量子化了。但是确定量子化规则的原理实际上是由原子周围电子的轨道角动量推导出来的。玻尔假设轨道角动量是量子化的，只能取某个最小单位的倍数（这里的单位与我先前描述电子时所用的单位相同，电子的自旋角动量为1/2个这个单位）。

如果超流体也受量子力学的支配，而且如果它也被迫形成某种环流的话，它的轨道角动量也会以相同的基本单元来量子化。这意味着将存在一个最小量的环流。

对于如何在这样的流体中将能量最小化，费曼进行了漫长而艰难的思考，最终得到了一幅物理学图景，其中流体在整体上是不会旋转的，但是在很多小的区域（事实上是尽可能小的区域，在几个原子的尺度范围内），每个区域都将围绕其中心区域旋转。这些中心区域会在垂直方向上排成一列，形成涡线，就像龙卷风的漏斗结构，或是排水管周围的漩涡（费曼语）。这些涡线将会在整体上不旋转的流体中以均匀的密度自发分布。

对涡线的思考使费曼推断出了液氦许多方面的行为，包括阻力是如何随涡旋激发的产生而形成的。当流体流动时，这些涡旋会互相扭曲和纠缠，哪怕速度达到想象中的百分之一，超流性也将被破坏。

最终，费曼通过创造性的想象，描绘出了朗道旋子（能量最低的局域激发态）的物理图景。费曼认识到，涡旋无须自容器顶部到底部排成一列，也能够自己卷曲成环状。他想到了他在高中时研究过的烟圈，他意识到，旋子可能是液体中可能存在的这类原子环的最小量子化单元，由此他得出了旋子的性质。费曼在脑海中进行了数学运算，并试图通过解方程来找出烟圈的直观图景与数学上的薛定谔方程之间的相互关系，最终，他获得了另一幅非常直观的图景：一群学童一个接一个、一轮接一轮地从滑梯上迅速滑下，然后缓慢地走到滑梯背面，爬上梯子。旋子可以是一个局部区域，其中流体相对于背景流体的移动速度不同，但是，为了保持量子力学的角动量性质，流体需要在其他某处形成反向流动。而在卷成环状的过程中，涡旋将会收缩，直到它携带可能的最小能量，即一个旋子的能量。

所有这些冥想都妙趣横生，但尤其重要的一点是，这些想法再一次改变了这个领域的物理学家对自己领域问题的思考方式。费曼对于“测试波函数”的直觉猜测（通过改变测试波函数来探索具有最低能量的态）确立了变分法在凝聚态物理中的应用，在过去半个世纪里，这种方法被应用于解决物质研究方面的几乎所有关键难题。

费曼错失了解决其中一些难题的机会，但其想法的影响力是毋庸置疑的。以他错过的难题之一超导性为例。在这一现象的解释方面，费曼从未取得过像物理学家约翰·巴丁（John Bardeen）、利昂·库珀（Leon Cooper）以及罗伯特·施里弗（Robert Schrieffer）那样的物理学突破，这在很大程度上是因为费曼并未尝试全面关注该领域的前期研究，这一难以克服的性格特征令他与许多重大发现失之交臂。但是，这些人的研究方法在很大程度上借鉴了由费曼引入的研究材料一般性质的方法，特别是有关超流性的那些解释。费曼运用时空方法来理解材料中电子性质的首篇论文，详细阐述了材料中电子耦合对振动模式的重要性。事实证明，这种耦合对于理解超导体中电子对结合在一起并凝聚的相互作用至关重要。实际上，施里弗曾作为听众聆听了费曼关于超流性和超导性的讨论，并被费曼详尽描述的自己关于超导性的错误想法所吸引。就在一年后，施里弗与他的同事们最终攻克了令他们获得诺贝尔奖的难题。他们理解超导性的方法与费曼类似，即弄清楚在超导情况下，像电子（不属于玻色子）这样的粒子是如何形成类似“玻色–爱因斯坦”的凝聚形式的。同样重要的是，他们证明了（正如费曼所证明的那样）在基态和激发态之间存在能隙，使得在低能量时，系统中不会发生能够产生激发态并使其能量消散的碰撞。

费曼关于如何通过涡旋的形成将角动量引入被迫旋转的超流体中的想法，也是极具先见之明的。超导体中存在极其相似的现象。超导体通常不会允许其内部存在磁场，恰如超流体会倾向于以非环状涡流的方式运动一样。然而，如费曼所示，如果流体被迫旋转（比如，通过在高压下冰冻，然后旋转并使其融化），环流将会以形成涡旋的方式出现。阿列克谢·阿布里科索夫（Alexei Abrikosov）后来表明，人们可以迫使磁场线通过超导体，但是它们同样也会以细小涡线的方式渗入超导体。他因为这项工作而获得了诺贝尔奖，他在获奖感言中说，他一度把最初的想法锁进了抽屉，因为朗道不太看好它。直到了解了费曼关于超流体中旋转的涡旋的想法，阿布里科索夫才有勇气发表他对磁性涡旋的观点。因此，费曼在凝聚态物理学领域所进行的探索十

分引人注目，不仅因为他的直觉能带来关键的见解，还因为在发表了区区四五篇论文之后，他已经为这一领域带来了有目共睹的影响。

在此期间，费曼热衷于接触新的物理学家群体，但他也感受到了由于进入自己不擅长的领域而产生的焦虑，有时也会因此遭受别人的打击。比如，在一次会议上费曼应邀发言，但他对涡旋的预测令昂萨格的学生深感意外。此后，他在一次凝聚态物理学会议上见到了昂萨格。在费曼发言之前的晚宴上，昂萨格问费曼："那么你认为你提出了一套关于液氦的理论？"费曼回答说："是的。"昂萨格的回应仅仅是："嗯……"这让费曼认为昂萨格对他期待不高。

然而，第二天，当费曼说他对相变的某个方面不甚理解时，昂萨格马上说道："费曼先生在我们领域还是位新人，显然他对这个领域的某些事情还不太了解，而我们理应教他。"这让费曼不知所措，但是昂萨格继续说，费曼在氦这一问题上的不解之处，在其他任何材料中都尚无定论，"因此，尽管他在氦Ⅱ问题上有所不解，但这丝毫无损于他为现象其余部分的理解所做出的贡献"。

昂萨格的热诚之举令费曼深深为之动容。在这之后，费曼继续和昂萨格见面并与他讨论问题，不过大部分时候都是费曼在说。昂萨格并非加里森·凯勒尔（Garrison Keillor）所说的明尼苏达州的那些挪威单身农民[注]之一，但是他同样来自挪威，且寡言少语，除非他觉得不得不说才会开口。

尽管费曼可能错过了一些奖项，但对他来说，最重要的永远是对物理学的理解。我们无从得知他是否曾因丢失奖项或错过荣誉而感到嫉妒或后悔，因为他从未表现出来。数不清的例子表明，费曼研究很多课题只是为了享受解开难题带来的满足感，他觉得没有必要将其写成论文，只为引起他人对自己想法的关注。并且，如果他发现其他人有同他类似的主意，他通常都会引用别人的工作，而不是他自己的。比如，或许是为了回应昂萨格在他们初次会面时的慷慨赐教，费曼总

是将涡旋的构想归功于昂萨格，即使他在昂萨格之前早已推导出了自己的结果。

体现费曼这种宽宏大量的最好的例子之一发生在费曼第一次考虑液氦和涡旋问题的20年之后。当思考如液氦薄膜这样的二维体系时，费曼意识到，可能出现的涡旋将大幅度改变它们的性质，从而导致某种相变，这种相变显然违反了有关这种二维系统行为的一个著名的数学定理。他甚至围绕这一内容写了一篇论文。然而他发现，在当时尚且默默无闻的两位年轻物理学家约翰·科斯特利茨（John Kosterlitz）与戴维·索利斯（David Thouless）刚刚撰写了一篇观点类似的论文。费曼不想埋没后辈，更没有抢先发表，相反，他决定放弃投稿，而仅仅满足于自己解决了这一问题。后来，这一不同寻常的相变被命名为“科斯特利茨–索利斯相变”。

但是，尽管费曼很享受暂时从粒子物理领域中尚无定论的实验和理论中脱离出来的这份轻松，他仍然盼望着能够发现自然界的新规律，而最有望使他达成目标的是处在最前沿的基础物理学领域。因此，在研究液氦的同时，费曼也在努力突破自己所在领域的研究前沿。狄拉克已经拥有了以自己名字命名的方程式，而费曼还没有。

---

1. 出自加里森·凯勒尔创立并主持的一档周末广播节目《草原之家的伙伴》。凯勒尔在节目中指出，要成为一个明尼苏达州人，首先也是最关键的一步就是要谦逊，这或许是他们从挪威单身农民一代传下来的神奇血统。明尼苏达人往往安静地完成他们的工作，而不是大呼小叫地喝一杯咖啡，吃一片大黄派。——译者注

第13章

上帝是个左撇子

那一刻，我知晓了自然界的运转之理。

——理查德·费曼

1950年，介子闯入了理查德·费曼的生活；1956年，介子已将整个粒子物理学界搅了个天翻地覆。新的粒子不断被发现，一种比一种古怪。在宇宙射线中产生了大量的粒子，解释其产生的物理学原理预言它们会快速衰变，然而，它们的寿命为百万分之一秒，这听起来并不是很长，却比人们根据第一性原理所预测的要长几百万倍。

到1956年，费曼已在物理学界建立了稳固的声望。费曼图已经成为标准物理学方法的一部分，每一个来过加州理工学院的人都会想方设法表达他们对费曼的敬意。每个人都想与费曼交谈，因为他们想要与费曼讨论自己正在研究的物理学问题。费曼不仅令女人们为之倾倒，也同样令科学家们为之折服。这一特质与卓越的意大利物理学家恩里科·费米如出一辙。费米荣获了诺贝尔奖，作为曼哈顿计划的重要顾问，在芝加哥大学领导建造了世界上第一台可控核反应堆；同时，费米也是世界上最后一位既精于理论又擅长实验的核物理和粒子物理学家。费米发展了一套简单的理论，描述了与中子衰变成质子相关的核反应过程［衰变过程还产生了一个电子和最终被费米称为“中微子（neutrino）”的粒子——这个词在意大利语中是“小中子”的意思］，即β衰变，这是原子弹及后来的热核武器中所发生的重要反应过程之一。费米就是因为这套理论而获得了诺贝尔奖。

中子在衰变前的寿命将近10分钟，相比于20世纪50年代发现的那些不稳定的强相互作用的介子，中子近乎不朽。人们认识到，控制中子衰变的作用力必须非常弱。β衰变中的相互作用（费米建立模型的基本相互作用）因而被称为“弱相互作用”。至20世纪50年代中期，人们逐渐明白，弱相互作用是自然界中确切存在的一种力，完全不同于创造了在加速器中观察到的所有新粒子的强相互作用，弱相互作用可能是所有寿命超长的粒子衰变的原因。但是尽管费米关于β衰变的模型很简单，却没有基础理论将所有被观测到并被归结为这种新作用力的相互作用联系起来。

费米将芝加哥大学理论研究组打造成了一个国际性的强大科研组织，每个人都渴望加入其中，去分享物理学的喜悦，以及与费米一起工作的兴奋。他有一个异乎寻常的特质，与费曼颇似：善于倾听他人。在与人交谈时，他们全神贯注于正在谈论的内容，并尽量去理解别人正在表达的观点，而且如果可能的话，他们还试图帮助对方改进那些观点。

不幸的是，费米1954年因癌症去世，或许是对放射性物质的处理不当所致，当时的人们对放射性物质的危险性认识还不充分。费米的去世是物理学界和芝加哥大学的巨大损失，他在芝加哥大学培养的年轻的理论科学家和实验科学家，将成为粒子物理学界的下一代领军者。

费米去世后，费曼成为年轻理论物理学家们崇拜的对象。和费米不同，费曼缺少那种孜孜不倦地帮助和培养年轻科学家的耐心。然而，对于当时的物理学家来说，没有什么比让费曼全神贯注于他们的观点更令他们兴奋的了。因为费曼一旦关注了一个问题，除非他解决了它，或者最终认定此问题不可解，否则他不会善罢甘休。许多年轻的物理学家都会将费曼对这些问题的兴趣误当作对他们个人的兴趣，这是极其诱人的。

来自芝加哥的25岁青年默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann），自幼就被誉为天才，他是被费曼的光芒所吸引的年轻科学家之一。如果说费曼主宰了战后初期的粒子物理学，盖尔曼则将统治接下来的10年。正如后来费曼以他赞美别人时惯用的口吻所说的那样："基础物理学知识中的每一个卓有成效的观点都应归于默里·盖尔曼的名下。"

这种说法毫不夸张。盖尔曼的才能刚好完美地适合应对当时粒子物理学界所遇到的问题。他在这一领域留下了不可磨灭的印记，不仅仅是因为他提出了"奇异数"和"夸克"这类异乎寻常的术语，更是因为他的思想。就像费曼一样，盖尔曼的思想至今仍然影响着物理学的前沿讨论。

不过，盖尔曼在很多地方都与费曼完全不同。和朱利安·施温格一样，盖尔曼也是位神童。15岁高中毕业时，他收到的最好的入学邀请来自耶鲁大学，这让他很失望，但他还是去了。19岁大学毕业后，他来到了麻省理工学院，21岁时就在这里拿到了博士学位。他曾告诉我，如果不是为了使毕业论文的主体内容尽善尽美，他本可以在一年内毕业。

21岁的盖尔曼不仅精通物理，且近乎全知全能。最著名的是他对语言的着迷，包括词源、发音以及不同语言间的相互关系。几乎所有认识默里的人都被他纠正过他们名字的发音！

但是盖尔曼和施温格有一个明显的不同，而这一差别正是费曼吸引他的原因。盖尔曼对那些以花哨的数学形式来表现自己工作（这些工作通常是微不足道的）的人没什么耐心。他能一眼看透这类把戏，而且他对别人工作的轻蔑程度在物理学家中也是罕见的。但是盖尔曼通过费曼的工作以及言谈了解到，费曼在研究物理时没有废话，没有伪装，只讨论纯粹的物理学。而且，费曼的解决方案确实很重要。如盖尔曼所说："我一直很喜欢理查德的风格，他的报告毫不浮夸。我厌倦了理论科学家用花哨的数学语言来装饰他们的工作，或者为他们有时相当平庸的贡献发明自命不凡的框架。费曼的想法通常是强大、巧

妙且具有开创性的，并且是以一种直截了当的方式呈现出来的，令我耳目一新。”

费曼性格中爱出风头的一面则令盖尔曼难以接受。如他所述，费曼“花费了大量的时间和精力制造关于他自己的趣闻逸事”。费曼的这一特性后来常令盖尔曼感到心烦，但是，1954年费米去世后，当盖尔曼思考离开芝加哥大学的可行性时——他想去哪里工作，与谁共事——答案是显而易见的。

1954年，盖尔曼和理论物理学家弗朗西斯·洛（Francis Low）利用费曼的QED理论合作完成了一项卓越的早期计算，其目的是解决该理论将随探索尺度的逐渐减小（确切地说是那些以传统方法完全无法观测的领域，费曼在这样的尺度上对理论进行了大胆的改变，以消除无穷大的结果）而发生哪些变化的问题。他们的计算结果令人惊讶，虽然当时的技术很难验证这些计算结果，然而最终，这项计算为20世纪70年代粒子物理学的许多进展奠定了基础。

他们发现，由于在探究QED中的量子力学效应时必须考虑虚“粒子–反粒子”电子对的影响，可测量的物理量（如一个电子所带的电荷）取决于人们的测量尺度。事实上，在QED背景下，当我们尝试穿过环绕着每个粒子的正负电子对时，电子携带的有效电荷以及电磁相互作用的强度似有增加。

费曼有一个出了名的习惯：他试图独立地推导——多数情况下是重新推导——所有的物理结果。因此，他往往会忽视其他人的论文。然而，盖尔曼和洛的论文给费曼留下了很深的印象。当盖尔曼第一次访问加州理工学院时，费曼就向对方透露了这一感受。据费曼说，这实际上是他所知道的唯一不是由他本人独立完成的QED计算。回过头来看，这有点儿令人不可思议，因为在消除量子场论中的无穷量这一问题上，“盖尔曼–洛”方法最终导向了与费曼在此后的一系列研究完全不同的另一种阐释。我们将在后文中谈到，尽管费曼一直认为他的重正化方法只不过是一种人为拼凑的手段，总有一天会被真正理解QED

的方法所取代，然而盖尔曼和洛的研究表明，这种方法实际上反映了一个潜在的物理现实，它是自然界在最小尺寸体系中运行的核心特征。

当盖尔曼来到加州理工学院时，他自己以及物理学界的大多数人都清楚地意识到，也许这一代人中最伟大的两位物理学家已被同一家机构招入旗下。所有人都在期待双星碰撞的火花。

以单一的标准去评价盖尔曼深奥至极且富有创造性的工作，难免有失公正。不过，盖尔曼已经在物理学史上留下了自己的印记，且将通过在自然界的最小尺度上发现新的对称性而不断稳固自己的地位。对称性是我们目前理解自然的核心，然而公众对其重要性却存在极大的误解。其中一部分原因在于，在物理学中具有更高对称性的事物，从艺术的角度去感知就会显得比较无趣。在传统上，一件艺术作品越是以华丽繁复的手段展现对称，它获得的评价就越高。因此，漂亮且拥有许多相同弯曲构造的枝形吊灯备受青睐。M. C. 埃舍尔（M. C. Escher）的艺术作品也是一个很好的例子，他在画作中嵌入了鱼或其他动物的许多形象。但是在物理学中，那些让自然尽量简洁的对称才是最为珍贵的，比如一个单调的球体远比一个正四面体更为对称。

这是因为物理学中的对称性意味着，在改变观察角度时，对称的物体或系统不会发生改变。如果我们将一个正四面体沿着经过它的任何一面的中心且与这一面垂直的轴旋转120度，它看起来都会和原来一样。然而，一个球体所具有的对称性更强大，因为在我们将球体旋转任何角度时，无论角度有多大，球体看上去都是一样的。对称性意味着，事物并不会随着我们观察角度的改变而发生变化。回过头来看，认识到这一事实似乎使对称性在物理学中的重要性呼之欲出。然而，直到年轻的德国数学家埃米·诺特（Emmy Noether）在1918年揭示了我们今天所说的诺特定理之后，物理学对称性的终极数学含义才得以显现。

诺特（她最初因为性别原因而无法在大学里获得职位）证明，自然界中存在的每一种对称，都必须对应着一个守恒的量，即不随时间改变的量。最著名的例子便是能量守恒和动量守恒。通常，学生们会在课堂上了解到这些物理量是守恒的，但是他们学到的更像是一种“信念”。然而，诺特定理告诉我们，能量的守恒源自物理定律不随时间而发生改变的特性：昨天如此，今天也如此。而动量的守恒定律源自物理定律不随位置而发生改变的特性：无论我们在伦敦还是纽约进行实验，结果都将是相同的。

20世纪50年代早期，加速器中出现的大量新的基本粒子迫使物理学家在混乱的表象之下找出一些规律，因此利用自然界的对称性来约束或支配物理学基本定律的尝试变得更为普遍。研究的重点在于寻找当一个粒子衰变成为其他粒子时能够保持不变的物理量。物理学家们希望这类守恒量能够让人们追溯到自然界潜在的对称性，并推导出描述相关物理学原理的数学方程式。最终，物理学家们得偿所愿。

1952年，盖尔曼因他所提出的一项理论而声名鹊起。他提出，新的介子之所以产量很高而衰变很弱，是因为与这些新粒子有关的一些物理量在强相互作用下是守恒的。他为这种奇怪的新的物理量赋予了一个或许最为贴切的名称——“奇异数”。然而，《物理评论》（他首次发表自己观点的杂志）保守的编辑认为，这个新名词并不适合出现在一本物理学出版物中，所以拒绝将它用在相关的论文标题中。

盖尔曼的想法是这样的：奇异数是守恒的，因此新粒子必须以“粒子–反粒子对”的形式产生，其中粒子和反粒子所具有的奇异数数值相等而符号相反。新粒子本身则需要是绝对稳定的，因为如果只有强力在起作用，衰变成非奇异粒子就会违反这一守恒定律，让奇异数改变1。然而，如果弱力（造成中子衰变并导致了太阳产生能量的那些反应）不遵循这一守恒定律，那么弱力就能够诱使这些新粒子发生衰变。但是由于这种力非常弱，所以粒子的衰变极为缓慢。

这个想法着实迷人，但物理学的成功不能仅仅依靠后见之明。这一想法能够提供哪些可供验证的预测呢？这的确是盖尔曼许多同事的第一反应。譬如，在氢弹研发过程中曾发挥关键作用的杰出实验物理学家理查德·加温（Richard Garwin）提出："我看不出它有什么用。"

当盖尔曼认识到，这种奇异的量子数可以用来对现有粒子分门别类时，这项研究取得了突破性的进展。他甚至做出了一个更加离奇的预测，认为一种叫作K^0的电中性粒子应该具有一种不同于它自己的反粒子，即反K^0。而大多数其他电中性粒子，比如光子，都等同于它们的反粒子。所以即便保守地说，这一预测也非同小可。最终它被证明是正确的，且"K^0–反K^0"系统成为探索物理前沿的研究典范，巩固了盖尔曼在当时崛起的新一代粒子物理学家中的声誉。

盖尔曼开始收到来自其他科研机构的工作邀请，是在他引入了奇异数，以及费米去世之后。盖尔曼想去加州理工学院与费曼一起工作，为了促成此事，加州理工学院开出了极具竞争力的入职条件，让年仅26岁的盖尔曼成为建校以来最年轻的正教授。人们希望，盖尔曼能和费曼一起，为学校带来真正具有突破性意义的历史事件。

费曼和盖尔曼是一对惹人注目的学术伙伴。为了解开粒子物理学前沿的最新谜团，他们二人会在办公室里争论不停。这是一种友好的争论，盖尔曼后来称之为"拧宇宙的尾巴"（twisting the tail of cosmos）。这种交流方式也影响了他们的学生和博士后。记得当年，作为哈佛大学的一位青年研究员，我曾与施温格从前的学生——诺贝尔奖得主谢尔登·格拉肖（Sheldon Glashow）一起工作过。我们的组会不时被争论和笑声打断。格拉肖曾在加州理工学院做过盖尔曼的博士后，我认为他深受在那里所目睹的讨论风格的影响，这种讨论风格也进一步影响了我，希望我的学生们也能从中受益。但从另一个角度来看，费曼和盖尔曼之间的合作，也代表着两种对立理念之间的艰难共处。盖尔曼是典型的有教养的科学家，而费曼则不是。盖尔曼天生喜欢评判别人和别人的想法，而且总想在理论发布方面抢占先机。费曼

欣赏天才，对物理学方面的无稽之谈或华丽浮夸没有耐心，但就像前文中提到的，如果他在学术发表上被别人抢了先，他最关心的是自己究竟是对是错，而不是谁最终获得了荣誉。这是一对有趣的组合，性情和作派上的差异终将为二人的合作带来麻烦，但短时间内尚不至于如此。

不过，在这一时期，两位科学家的创造力都接近了巅峰。盖尔曼在基本粒子世界所掀起的革命刚刚开始，而费曼刚刚完成了他在量子力学领域的革命。当他们开始一起工作时，另一个棘手的物理学问题出现了，这个问题在某种程度上同盖尔曼一直在分类的新的奇怪粒子有关。这个问题远比盖尔曼理论所解释的新粒子的超长寿命更令人费解，它与自然界最普通的，也是被看作常识的一种对称性有关，这种对称性是物理世界的特征之一。

我们都在童年的某个时刻学会了区分左右。这并非易事，费曼常常告诉他的学生，有时他甚至需要看一眼左手上的痣才能确定左右。这是因为，“左”和“右”的区分具有任意性。如果我们将所有的“左”叫作“右”，所有的“右”称为“左”，那么除了名称之外，一切都没有改变。

换一种思考方式，就像费曼曾经描述过的那样：如果我们与另一个星球上的外星人交流，我们该如何将左和右的区别告知他们呢？当然，如果他们的行星有像地球一样的磁场，并且也像地球一样绕着他们的太阳公转，公转方向也与地球一致，我们就可以让他们拿一块条形磁铁，并将北极指向北方，然后“左”可以被定义为太阳落下的方向。但是他们可能会说：“是的，我们有条形磁铁，但是哪一端是北呢？”

我们可以不断列举这样的假设，来说服自己诸如“左”和“北”这样的术语都是我们任意发明、约定俗成的，但究其本质并没有终极意义。但万一有呢？诺特定理告诉我们，如果我们将“左”与“右”翻转，

自然界将不会发生改变，那么应该存在一个守恒的量，不随任何物理过程而改变。我们称这个量为“宇称”（parity）。

然而，这并不意味着所有单个物体都是左右对称的。你的头发可能偏向某一侧，或者你的左腿比右腿略长一些。然而，镜子中的另一个你的头发则会偏向另外一侧，右腿比左腿更长一些。在交换左右之后仍然保持不变的事物被称为具有“偶宇称”，比如球体；而在交换左右后发生变化的事物被称为具有“奇宇称”。诺特定理告诉我们，如果不管偶宇称还是奇宇称物体，在镜像世界中遵循的物理学定律都与原本的世界相同，那么，相关的守恒定律就可以告诉我们，偶宇称物体不会自发地变成奇宇称物体。而如果存在这样的变化，我们就可以利用这种自发的变化来定义绝对的“左”和“右”。

基本粒子可以按照宇称性质来分类，宇称性质通常关系到它们与其他粒子相互作用的方式。一些相互作用属于奇宇称，而另一些则属于偶宇称。诺特定理告诉我们，单个偶宇称的粒子不能衰变成单个奇宇称的粒子加上一个偶宇称的粒子，但可以衰变成两个奇宇称的粒子。因为如果一个粒子向左，而另一个粒子向右，在整个世界的左右互换以后，粒子的方向发生了翻转，与此同时粒子特性也随着这种宇称变化而互换，那么最终得到的组态型与左右翻转之前是一样的。也就是说，整体上与初始粒子一样，都具有偶宇称。

至此一切顺利。然而物理学家发现，被称为K介子的奇怪介子，尽管盖尔曼利用奇异数对它的长寿命进行了解释，但其衰变并不遵循这个规则。物理学家们观测到，K介子会衰变成更轻的π介子，但是有的时候它们衰变成两个π介子，有时又衰变成三个π介子。π介子具有奇宇称，所以两个π介子的态反映出来的宇称性质与三个π介子不同。如此一来，一个K介子既可能衰变成两个π介子，又可能衰变成三个π介子就是不可能的事了。因为如果真是这样，就意味着初始粒子有时具有偶宇称，有时则具有奇宇称！

一种简单的解释是，一定有两种不同类型的K介子，一种具有偶宇称并衰变成两个π介子，而另一种具有奇宇称且衰变成三个π介子。问题在于，被物理学家称为τ和θ的两种K介子看起来完全相同，具有相同的质量和相同的寿命。为什么自然界会产生两种如此相似却又有区别的粒子呢？使它们具有相同质量的可能是某种新奇的对称性，盖尔曼和其他科学家仔细思考了各种各样的可能性，但是同时也得到相同的寿命则不太可能，这是因为在其他条件相同的情况下，衰变成三个粒子的一般量子力学概率要远小于衰变成两个粒子的概率。

这便是1956年春天，费曼与盖尔曼开始在加州理工学院共事时的情形。他们都参加了当时最重要的粒子物理学会议——罗切斯特会议（当时这一系列会议一直在纽约州的罗切斯特大学举行[注]）。在那里，他们了解到了一些有说服力的新数据，再次证明τ和θ可能是由同一粒子分裂而成的一对双胞胎。

事实是如此难以验证，以至于一些物理学家开始暗中怀疑τ和θ是否真的不同。参会期间，费曼与一位叫马丁·布洛克（Martin Block）的年轻实验物理学家同住一个房间。会议记录显示，在周六的会议接近尾声时，费曼起身替布洛克向专家提出了一个问题：两种粒子是否可能实际上是相同的，只是弱相互作用并不遵守宇称守恒？这意味着，在某种程度上，大自然可能区分左右。

据说，盖尔曼事后毫不留情地嘲笑了费曼，说他没有勇气以自己的名义提出这个问题。为此我联系了我的老朋友马蒂[注]，并问他当时究竟发生了什么。他证实自己曾询问费曼，为什么弱相互作用不能违背宇称守恒。费曼起初认为这种想法很愚蠢，但他后来发现自己无法给出答案。会议期间，费曼和马蒂每晚都在争论这个问题，最后费曼建议马蒂在会上提出这种可能性。马蒂说没有人会听他的，并请求费曼代他在会议上提出来。费曼向盖尔曼转述了这个想法，想看看他是否能明确地解释为什么这是不可能的。而盖尔曼也没有给出答案。因此，费曼只是在沿袭自己一贯的做法，让他人获得应有的认可，而不

是借他人之名提出一种可能惊世骇俗且存在明显错误的观点，以此来避免自己被嘲笑。

费曼的问题得到了青年理论物理学家杨振宁的回应。根据官方记录，杨振宁当时的回答是，他和他的同事李政道一直在研究这一问题，但是没有得出任何结论。（布洛克告诉我这份记录不正确，他记得杨振宁当时的回答是：目前没有证据显示存在弱相互作用中宇称不守恒的情形。）

费曼和盖尔曼在会上讨论了布洛克的问题，随后他们发现，他们并没有充足的经验性的理由，来解释为什么在弱K介子衰变的过程中，宇称对称性的破坏是不可能的。如果弱相互作用违反了宇称，那么它又在粒子物理学的哪些方面发挥着作用呢？人们对弱相互作用本身还没有理解得足够清楚。前文提过，费米提出了一个关于典型弱相互作用衰变（被称为β衰变，即一个中子衰变成为一个质子）的简单模型，但是对于不同种类的已知弱相互作用衰变还没有统一的描述。

费曼和盖尔曼这两位理论巨头都对这种奇怪的可能性进行了反复思考，参会的很多其他物理学家也对这一问题反应激烈，甚至为宇称是否守恒而打赌。而与此同时，两位年轻的物理学家李政道和杨振宁（也是盖尔曼昔日在芝加哥大学时的同事）带着勇气和过人的学术胆识回到了芝加哥，对所有数据进行了严谨的分析，看是否可以排除弱相互作用过程中宇称不守恒的可能性。他们发现，已有实验无法对这一问题做出肯定性的回答。更重要的是，他们提出了一项关于β衰变的实验，如果宇称被破坏了，中子被极化并朝着特定的方向旋转，那么宇称不守恒意味着电子（中子的衰变产物之一）将倾向于朝某些特定的方向射出（从一个点出发往整个空间的不同方向的可能性可以看成一个球，李、杨认为在这种情况下电子会倾向于在这个球的某一半所包含的方向上产生，而非另一半）。他们将这个推论写成了一篇精彩的文章，发表于1956年夏天。

这种假设似乎很疯狂，却值得一试。他们说服哥伦比亚大学的同事、β衰变方面的专家吴健雄放弃了和丈夫的欧洲度假之旅，去进行一项有关钴–60的中子衰变实验。那个时代与我们今天所处的时代不同，如今，粒子物理学的理论预测和实验验证之间可能相隔数十年，而彼时，不到半年，吴健雄就从实验中获得了证据，不仅证明了在她的实验仪器中生成的电子是不对称的，而且这种不对称在物理学上几乎是普遍存在的。

在李政道的劝说和吴健雄的实验结果的鼓舞之下，哥伦比亚大学的另一位实验物理学家，后来的诺贝尔奖获得者利昂·莱德曼（Leon Lederman）进行了一项有关π介子衰变的类似实验。莱德曼和他的同事理查德·加温在星期五的教员午餐会上讨论了实验可能性后，以在后辈物理学家眼中几乎不可思议的速度，重新配置了他们的仪器，并在星期一获得了实验结果。不出一天，吴健雄也完成了对自己实验结果的验证。宇称的确受到了最大限度的违背。用对此持怀疑态度的理论物理学家泡利的棒球类比[注]来说，上帝并不是一个“弱左撇子”[注]，而是个“强左撇子”。

这一结果造成了轰动。我们所处世界中如此神圣不可侵犯的对称性，在最基本的层面上竟被自然界已知的四种作用力之一所违背，一石激起千层浪，这样的论断不仅轰动了整个物理学界，在舆论界也引起了极大的反响。（杨、李二人在哥伦比亚大学召开了现代物理学史上最早的新闻发布会之一，宣布他们的提议得到了实验的证实。）这是物理学史上发展最迅速的研究之一。1957年，李政道和杨振宁共同获得了诺贝尔物理学奖，此时，距离他们提出宇称不守恒假设仅过去了一年的时间。

为什么费曼没有跟进研究他在罗切斯特会议上提出的问题呢？他发现自己又一次接近了物理学中一个至关重要的问题的答案，却没有努力获得结论。这种倾向可能反映出了他性格中的一个特征，这一特征在他的职业生涯中多次影响了他：他不希望追随其他物理学家的研

究方向。如果整个物理学界都关注同一个问题，他就想要避开这个问题，并让自己的思维保持在开放状态，这样他就可以自始至终按照自己喜欢的方式去解决谜题。而且，他讨厌阅读物理学文献，而这恰恰是李政道和杨振宁所完成的工作的基础。

不过，也可能是因为费曼有更重要的事情要做，至少他自己是这样认为的。认识到弱相互作用违反宇称守恒的确很重要，但并不能和提出新的自然理论相提并论。这是费曼内心热切渴望的事情。他一直觉得他在QED方面的工作只是一种人为拼凑的技术手段，并不像他的偶像狄拉克所推导出的方程式那样，是一种理论的基石。

费曼更感兴趣的是，他有没有可能发展出一种理论，将观测到的所有不同的弱相互作用现象，包括中子、介子、K介子等完全不同类型的粒子的衰变，都纳入同一表述。费米曾为β衰变建立了一个粗略却漂亮的临时模型，但是不同粒子在弱相互作用下衰变的数据是不确定的，也无法统一。因而，最关键的问题就是：是否存在一个统一的弱相互作用理论，可以描述所有这些过程？如果有，它应该是什么形式？

同为物理学家的费曼胞妹痛斥他在宇称不守恒问题上过于怯懦。因为她很清楚，只要稍加努力，再勤奋地写出文章，整件事情就会完全不同。她力劝费曼，当对待自己在弱相互作用上的观点时，不要采取自由放任的态度去思考。

如今，我们可以将弱相互作用中违反镜面对称的现象简单地概括为：作为β衰变的产物，被费米命名为“中微子”的神奇粒子是“左手性”的，是唯一已知的只参与弱相互作用的粒子。如前所述，大多数基本粒子具有角动量，并体现出旋转的特性。沿一个方向旋转的物体，如果通过镜面来观察，将会沿着相反的方向旋转。根据实验结果，所有其他已知粒子，都既有沿着顺时针旋转的，也有沿着逆时针旋转的。而迄今为止，在我们所知的范围内，唯有这种难以捉摸且只参与

弱相互作用的中微子，最大限度地违反了“镜面对称”：它们只沿一个方向旋转！

在1957年的罗切斯特会议上，李政道在阐述他和杨振宁的研究工作时，间接提到了这一深层含义，并引起了费曼的关注。更早以前，当费曼在大学期间与特德·韦尔顿第一次尝试重新推导狄拉克方程时，他错失了一次机会，提出了一个更简单却不能恰当地纳入电子自旋的方程。狄拉克方程有4个不同的参数，可以描述电子的两种不同的自旋状态，以及其反粒子（正电子）的两个相应的自旋状态。

费曼现在认识到，他可以利用自己的路径积分形式自然而然地推导出一个与狄拉克方程相似却更加简洁的方程。令他感到兴奋的是，这个方程式只有两个参数。他觉得如果历史能够重写，他的方程可能先被发现，而狄拉克方程可能晚些时候才根据他的方程被推导出来。当然，他的方程最终会得出与狄拉克方程相同的结果。他的方程描述了电子的一个自旋态，以及正电子的一个自旋态，而且他有另一个相似的方程可以描述另外的两个状态。因此，他的方程并非真正的创新，但确实提供了一种新的可能性：对于只表现出一种自旋态的中微子，他认为他的方程更加合理。

然而，这其中存在一个问题。如果试着在数学上整合这类公式，来描述导致β衰变以及产生中微子的弱相互作用，得到的结果似乎与实验科学家从实验中得到的结果并不相同。但令人费解的是，这些实验结果本身就是不确定的，而且与单独一种力的作用结果不符。如果将所有描述中子、质子、电子以及中微子（后三种粒子是中子的衰变产物）相互作用的不同数学表达式进行分类，将会发现5种不同的物理量：标量（S）、赝标量（P）、矢量（V）、轴矢量（A）和张量（T）。这种数学分类方式描述了相互作用在自旋和宇称翻转下的性质。弱相互作用违反宇称守恒则意味着，这种相互作用结合了至少两种不同类型的相互作用，这两种相互作用具有不同的宇称性质。问题

在于，β衰变实验表明这种组合是S和T，或V和T，而费曼的公式给出的结果则是V和A的结合。

费曼并不是唯一在思考这些问题的人。一段时间以来，盖尔曼也一直在思考宇称问题，并同样热衷于将各种弱相互作用衰变统一起来。同样是被李政道和杨振宁抢得先机，盖尔曼或许比费曼更为苦恼。当费曼再次前往巴西纵享夏日风情时，盖尔曼选择留在加利福尼亚继续工作。

但是，对这个问题感兴趣的还有其他人，比如一位相当悲情的印度物理学家E. C. G. 苏达山（E. C. G. Sudarshan），他于1955年到罗切斯特大学与物理学家罗伯特·马沙克（Robert Marshak）一起工作。1947年，马沙克提出在实验中观测到两种不同的介子：一种是π介子，对应于物理学家们所预测的强相互作用粒子；而另一种是μ子，我们现在知道它可以被看作“超重版的电子”。作为罗切斯特会议的创始人，马沙克在学界很有名望，当时粒子物理学界的一些重大问题，如τ–θ问题和宇称不守恒问题，都在罗切斯特会议上得到了充分的讨论。

作为一名研究生，苏达山已经对核物理有了系统的学习和了解，尤其在中子的β衰变方面。在宇称不守恒被发现后，他和马沙克对当时的实验数据进行了研究，并认为将原子核β衰变归因于S和T的组合的传统观点一定是错误的。他们认识到，所有的弱相互作用衰变，包括μ子衰变，能且只能以V–A的形式统一起来。

值得注意的是，苏达山本打算在1957年的第7届罗切斯特会议上展示这些结果。然而，作为罗切斯特会议的主席，马沙克却认为，苏达山以研究生身份参会不大合适，而马沙克自己则要在大会上就另一个主题进行综述性的报告，他自己也无法在会议上对这一课题做报告。就这样，他们错失了向学界宣布自己物理思想的绝佳机会。由于有关μ子衰变为π介子，π介子随后又通过弱相互作用衰变为电子和中微子的实验数据并不是十分确切，所以，马沙克可能对于在当时做出确定性的声明有所犹豫。

随后，马沙克和苏达山利用整个夏天对当时的数据进行了完整细致的分析，并撰写了一篇文章，提出了弱相互作用的V–A通用形式（马沙克在当年秋天意大利帕多瓦的会议上介绍了它）。这是一个勇敢的主张，因为这意味着至少4个不同的实验结果是错误的！在此期间，马沙克和苏达山在加州大学洛杉矶分校，于是顺便拜访了盖尔曼，盖尔曼还为他们安排了一次与加州理工学院实验学家费利克斯·伯姆（Felix Boehm）的会面。马沙克和苏达山向盖尔曼解释说，他们觉得这些实验可能是错误的。盖尔曼也曾考虑过V–A的组合形式，却因为与一些实验数据不符而放弃了。伯姆也证实了他们的观点，因为他最新的实验发现与V–A组合的理论相符。

盖尔曼同样也认识到，如果确实存在能统一描述弱相互作用的理论形式，那么V–A就是唯一合理的组合形式。他告诉焦虑的马沙克和苏达山二人，他无意就此主题撰写论文，但是在他正在撰写的一篇关于弱相互作用的长篇综述中，他可能会在其中的一个段落提及这种可能性。随后，盖尔曼启程去度假，马沙克和苏达山则启程回了家。

与此同时，费曼一直痴迷于“统一弱相互作用”的想法，这可能是他发现基本物理学定律的最后机会。然而，由不同实验结果带来的混乱状态却成了绊脚石。在盖尔曼休假期间，费曼回到了帕萨迪纳，他了解到伯姆和盖尔曼此前谈论了V–A组合最终与实验结果相符的可能性。

费曼如梦初醒。如果这是真的，那么他用符合β衰变的包含两个参数的简单数学形式来描述中微子的想法就是正确的！他后来这样说道：“我在那一瞬间从椅子上迅速站了起来，并喃喃自语道：‘我全明白了！我全明白了！我明天早上就向你们解释这一切！’……当我这么说的时候，他们以为我是在开玩笑……但是我没有开玩笑，我所需要的正是从认为这是S和T的束缚中解脱出来，因为我有一个理论，如果V和A是可能的，那么V和A就是正确的，因为这样的理论简洁并且优美。”费曼兴奋异常，他确信自己是世界上唯一一个理解用V–A组合能

够得出弱相互作用的通用表达式的人。确实，他这样想自有其独特的原因——源于他独特的数学表达形式。他以极快的速度写出了一篇论文的草稿。他觉得，这就是他长久以来殷切盼望的关于自然界的新理论。

与此同时，盖尔曼回到了加州理工学院，并了解到费曼在为他的观点撰写论文。尽管盖尔曼已在思考V–A组合上有了自己的论据，这些论据与电流，即粒子进入或离开反应时所伴随的电荷流有关，但他仍决定不顾自己对马沙克的承诺，开始撰写自己的论文。

这种情形会让系主任的生活变得毫无乐趣可言（这对于当过12年系主任的我来说，实在是再熟悉不过了），加州理工学院的物理系主任认为，他的两位学术明星不应该用论文“决斗”，并要求他们合作撰写一篇论文。令人惊讶的是，费曼和盖尔曼同意了。

“费曼–盖尔曼”论文带着一种有趣的混拼之风，但仍然不失为一篇杰作。它兼具两个人所长：费曼的双参数中微子公式形式（尽管在当时看上去有些勉强，但事后证明非常有用），以及盖尔曼在与弱流相关的守恒量和对称性方面的卓越见解（在几年后将被证明是有用的，其作用远不止体现在对β衰变的理解上）。

不用说，“费曼–盖尔曼”论文的内容迅速传播开来，而可怜的苏达山不得不一次又一次忍受将V–A组合的理论归功于这两位物理学领军人物的说法，虽然盖尔曼坚持在他们论文的致谢部分强调了同马沙克和苏达山的讨论，且总是尝试为苏达山提供书面支持。而费曼随后向苏达山坦陈，他已经被告知苏达山是最先提出V–A组合理论的人，且后来又公开承认了这一点。但是，多年以来，“费曼–盖尔曼”论文一直是人们在讨论这一问题时所引用的经典且唯一的参考文献。

这可能是费曼职业生涯中唯一一次被一个想法强烈地驱使，兴奋而又迫切地想要将它亲自发表。他感到，这可能是他最为自豪的时刻，或者用他自己的话来说：“那一刻，我知晓了自然运转之理。它优雅而美丽，还闪闪发光。”这篇论文作为当时粒子物理学领域最具创造

力的两位科学家联手打造的杰作，也确实不负众望。尽管并未惊天动地，也不是完全出人意料，而且也不是某一方面的完整理论（弱相互作用的完整理论还需要10年才被提出，再经过10年才被广泛接受），但抛开费曼的主观评判，对于整个世界而言，这似乎意味着，自1954年盖尔曼迁往加州理工学院并来到费曼身边开始，在他们之间所形成的一种合作关系已经取得了某种成果，且预示着一些伟大的事情即将发生。《时代》周刊将他们选入美国科学界的重要人物之列："在黑板前，二人的思想如同从磨刀石上飞溅而出的火花迸发出来。他们轮番拍打着额头，指责对方过于简单化，吹毛求疵地争论横贯墙面的方程的细微之处，并将回形针投向远处的目标以补充灵感。"

然而，这并不是一段美好合作的开始，而是更接近终点。尽管对彼此的能力和想法始终心怀尊敬，但这两位天才的合作原本就勉为其难，他们未来的工作也最终走上了两条平行的轨道。当然，他们会向对方寻求建议，并定期交换彼此的观点，但再也不会联合起来去"拧宇宙的尾巴"了。不久，盖尔曼就做出了他对物理学最伟大的贡献；费曼则在差不多10年的时间里将注意力转向他处，然后再回到粒子物理学领域，并且以一种颇具讽刺意味的方式，帮助盖尔曼向世界证明了其数学发明——夸克——可能真的存在。

---

1. 这一系列会议叫作"国际高能物理大会"，在刚创办的前几年一直在罗切斯特举行，从1958年开始由世界各地轮流举办，但"罗切斯特会议"的名称被沿用了下来。——编者注

2. 马丁·布洛克的昵称。——编者注

3. 棒球的击球队员有的偏好从右往左击球，有的偏好从左往右击球，通常这一选择与队员的惯用手是左手还是右手有关。——编者注

4. 泡利一直坚信宇称守恒，并为此打赌，他曾说过："我不相信上帝是个弱左撇子"。事实上，李政道和杨振宁证实，上帝不仅是个左撇子，还是个"强左撇子"。——译者注

第14章

夺魁之路

发现的乐趣即是奖赏。

——理查德·费曼

费曼终于抓住了时机，写出了一个高明的理论，并为自己成为世界上第一个揭示这条全新的自然法则的人而感到心满意足（事实证明，这种感觉是错的[注]）。现在，他可以陶醉于和盖尔曼一起成为聚光灯下的焦点，并尽情享受身处物理世界中心的乐趣。

因为有了盖尔曼和费曼，加州理工学院成了物理学家的聚集之地，人们前去学习、合作，或仅仅是通过他们这一代最伟大的两位物理学家的共同智慧来反思自己的想法。一群富有创造力的年轻理论物理学家将在那里学习，然后继续出发，去寻找美丽的新世界。费曼本人几乎没有研究生，但费曼、盖尔曼二人的联合魅力足以引来学生和博士后研究人员，他们中的许多人成了未来的诺贝尔奖得主。

一些人震惊于自己所受到的关注。巴里·巴里什（Barry Barish）当时还只是一名刚刚崭露头角的年轻实验物理学家，他来自伯克利，后来成了费曼在加州理工学院的同事。巴里什在组会上做了一次报告，没想到费曼也坐在下面，还向他提出了一连串问题，令他手足无措。巴里什最近向我透露，他当时感觉自己很重要，并为此扬扬得意，直到有人告诉他，所有的组会费曼都会出席，而且总是喜欢提问。换句话说，费曼的那次到访并无特别之处。

与此同时，加州理工学院也是个令人生畏的地方。盖尔曼有时会很犀利，通常是在私下里。在极少数情况下，当费曼对某人的工作不屑一顾时，他可能会公开地表达蔑视，甚至比蔑视还要严重。人们并不总是很清楚，究竟是什么惹怒了他。诚然，他对胡言乱语没有多少耐心，但对那些有效的，甚至明智的，只是在风格上不与他符合的方法，他的反应也很消极。年轻的理论物理学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）来加州理工学院报告自己学术思想时所遭受的待遇，便是其中一例。温伯格后来成为世界上最受人尊敬、最有建树的物理学家之一（他后来因为提出了弱相互作用的完整理论并将弱相互作用与电磁作用统一起来而与人共同获得了诺贝尔奖），他经常寻求对问题详细而正规的解答，从一般情况推导到特殊情况，与费曼的研究方式正好相反。这位货真价实的物理学家遭到了费曼和盖尔曼毫不留情的质疑，以至于他几乎无法完成报告。

通常，惹费曼生气的只会是那些在证据不足的情况下发表一些毫无根据的断言，从而在他看来侮辱了物理学的人。对于费曼而言，物理是第一位的，谁对谁错无关紧要。我记得的最著名的例子可能跟弗雷德·莱因斯（Fred Reines）有关，他在1956年首次通过实验证实了中微子的存在，并因此获得了1995年的诺贝尔物理学奖。在1956年的实验之后，莱因斯在很长一段时间里仍继续研究来自核反应堆的中微子，并于1975年宣布，有证据表明中微子具有不同的类型，当它们从反应堆内部释放出来时，会从一种类别振荡为另一种类别。如果这是真的，这一结果将非常重要（事实表明，中微子确实会振荡——只是振荡的方式不像莱因斯所说的那样）。费曼检查了实验数据，并证明了莱因斯所说的效应无法得到实验结果的支持。费曼用自己的结论与莱因斯公开对质，终止了这次误报。差不多40年之后，莱因斯才因他最初的发现而被授予诺贝尔奖，恐怕与这次尴尬不无关系。

虽然费曼对自己在QED方面工作的重要性持怀疑态度，但他的学术声望却日益提高，这也使他多年来一直身背重负。在1957年，与盖尔曼在弱相互作用方面的合作使费曼获得了解脱。虽然从未对粒子物

理学失去兴趣，但现在的费曼似乎可以在更大的范围内自由探索，在其他领域施展才华。

与此同时，费曼在感情上游移不定，私生活再次陷入了混乱。1958年，费曼参加了在日内瓦举行的首届海外罗切斯特会议，并做了有关弱相互作用物理学概述的报告。他本来计划与加州理工学院一位助理研究员的妻子结伴而行，他们之间的关系显然不那么一般。而此时，他与另一位已婚女士的私情即将不体面地结束，这位女士的丈夫准备控告他，并向他索赔。终于，这场喧嚣得以平息，这位被抛弃的情人最终将费曼所获的一枚金牌（1954年爱因斯坦奖的一部分）和阿琳的一些画作还给了费曼。

在日内瓦，费曼形单影只，因为他的情人决定不来瑞士，而是稍后与他在英国碰头。在日内瓦的海滩上，他邂逅了一位年轻的英国女士，年仅24岁的格温妮丝·豪沃思（Gweneth Howarth）。当时她正以互惠生的身份周游世界，除费曼之外，她还有至少两位男友。所以，从这个角度上讲，两个人的情况比较相似。不出所料，费曼当晚带她去了夜店。但令人吃惊的是，费曼离开日内瓦前邀请她去美国当他的管家，并且主动提出将协助她办理相关的移民手续（关于他是否又前往伦敦与另一位情人相会，我们就不得而知了）。当然，这项计划不可避免地被推迟了，正当费曼继续料理他与那位被抛弃的情人（费曼曾考虑和她结婚）之间的感情残局时，格温妮丝也卷入了几桩浪漫情事，在是否要去美国这件事上举棋不定。因此，虽然他们之间的确擦出了火花，但我们很难确切地知道费曼或者格温妮丝对这些情感纠葛的真实想法。

费曼注意到，在当时的情况下，一个40岁的男人帮助一位24岁的女性入境，并将其安排在自己家中，往好了说似有不妥，往坏了说是违犯法律的。因此，他的一位同事，乐观开朗、自由奔放的实验物理学家马修·桑兹（Matthew Sands），同意以自己的名义递交申请资料。经过一年多的耽搁，格温妮丝终于在1959年的夏天抵达了帕萨迪纳，

帮助这位孤独的单身汉将其原本冷清的住所变成了一个可以称之为“家”的地方。她继续和别的男人约会——也许只是做做样子，这很难说——但这种行为也在减少。最终她开始陪伴费曼参加社交活动，但为了保持形象，两个人通常不会一起出门。她到美国刚一年出头，费曼就向她求婚了。

这个故事听上去就像小成本电影里的情节，而不是真实的生活。人们完全有理由相信，费曼的轻率之举会像他以往的诸多风流韵事一样，以灾难告终。然而事实并非如此。两年后，他们有了一个儿子，名叫卡尔，还养了一条狗。费曼买了一处房子，离他的同事兼合作者盖尔曼及其英国新娘的家不远。费曼的母亲搬了出去，也住在附近。费曼变成了一个顾家的男人。他和格温妮丝后来又领养了一个孩子，也就是他们的女儿米歇尔。直到费曼去世，他们的婚姻生活都很幸福。

费曼的个人生活终于安定了下来（毕竟也不可能变得比以往更不安定了），但他的思想从未停歇。费曼考虑进入另一个研究领域，在他的朋友——物理学家出身的生物学家，未来的诺贝尔奖得主马克斯·德尔布吕克（Max Delbrück）的鼓动下，他尝试涉猎遗传学，但并没有持续多久。

费曼继续与盖尔曼一起研究弱相互作用，并在组会上取笑他（这种争论可能会随着时间的推移而升级），但他的心似乎已经不在这项工作上了。为了解释一个令人费解的实验结果，他们两人想到可能存在两种不同类型的中微子，但费曼对此失去了兴趣，拒绝为此撰写论文。后来，利昂·莱德曼、梅尔文·施瓦茨（Melvin Schwartz）和杰克·施泰因贝格尔（Jack Steinberger）因为通过实验验证了这一理论而获得了诺贝尔奖。在另一篇与盖尔曼及其他几位同事合作的文章中，费曼同意联合署名，但是在预印本发出后，他又让出版方在正式出版前删除了自己的名字。

1961年，出现了一个前所未有的机会，它以一种全新的方式开启了费曼的创造力，并帮助他在物理学界乃至更大的范围内取得了新的成就。这个机会无关新自然法则的发现，而是涉及一种教授物理学的新方法。

加州理工学院的本科生需要学习两年的物理学入门课程，但像大多数同类课程一样，这门课总是令人失望。对那些在高中时就对物理兴致勃勃，想要了解相对论和现代物理学奇迹的最优秀和最聪明的学生来说，这种感觉尤其强烈。他们并不想从小球滚下斜面开始重新学习。费曼曾就这一问题与马修·桑兹探讨过一段时间。在马修·桑兹的鼓动下，那位促成了费曼和盖尔曼短暂合作的物理系主任罗伯特·巴彻（Robert Bacher），决定对这门课进行改良。在桑兹的再次建议下，巴彻决定让费曼为大一新生讲授整个物理学入门课程。虽然费曼不是以授课闻名，但他在康奈尔大学的教学反响却非常好，而且整个物理学界都知道，一旦认真起来，费曼便是一位天资超凡的演说家。他充沛的精力、通俗的表达方式、对物理的直觉、来自长岛的口音，以及他与生俱来的才华，使他在任何讲台上都散发出一种迷人的光彩。

自此，费曼接受了一系列挑战。终其一生，他都不知疲倦地沉浸于以自己的思想重建物理法则的知识体系。自孩提时代起，这种以自己的方式理解物理学的冒险行为就是他研究物理学的推动力。而现在，他有了一个将自己心中的图景展示给他人的机会。（我后来在阅读马修·桑兹的回忆录时发现，他用了几乎同样的话来说服费曼教这门课！）他不仅可以在物理学的最前沿打下自己的烙印，也可以将自己的思想镌刻在使我们理解物理学核心内容的非常基本的概念上。在接下来的两年里，他在课程建设方面贡献了前所未有的精力和创造力，这种投入是战争结束以来所不曾有过的。

这个机会的出现恰逢其时。费曼在当时可以有这样的付出，部分原因在于他的不羁之心已然收敛。婚姻和家庭生活的稳定使他不必过多地关注自己的需求和欲望，也无须以频繁的冒险来掩盖自己的孤

独。更重要的是，此时的他可以在一个地方安顿下来，花些时间去构思对物理学基础知识的全新入门课。他不仅可以将自己对这个世界的个性化理解呈现给他人，还可以向别人展示是什么激起了他的探究之欲。在揭开物理世界奥秘的过程中，他可以在各种现象与概念之间建立新的联系，而这正是科学的全部意义。他想以最快的速度带领学生去探索令人激动的前沿奥秘，同时让他们发现，这些“奥秘”并不都是晦涩难懂的，它们中的许多都与现实世界中的现象有关，比如煮燕麦片、预测天气或者水自上而下流出水管的过程。

每天他都会先于学生来到教室，面带微笑，准备以一种妙趣横生而又完全独创的方式向学生们展示一切，从经典力学到电磁学、引力、流体、气体、化学，乃至最终的量子力学。他在一个庞大的演示台与巨幅黑板间来回走动，声音洪亮，表情夸张，绘声绘色，幽默生动。下课之前，他不仅要确保将整个黑板写满，还要确保他已将在课程开始时提出的观点都讨论了一遍。他想要让学生们知道，缺乏相关的知识并不会削弱他们对物理学的理解，通过努力，即使是大一新生也可以准确描述一些现代物理学现象。

最重要的是，他想要拿出一份理解物理学的指南，他称之为“给迷途者的指南”（或许是借用了12世纪哲学家摩西·迈蒙尼德的一本著名小册子的标题）。正如费曼所说：

> 我想要向班上最聪明的学生讲解这些课程，并确保，如果可能的话，即使是最聪明的学生也不能完全消化课程中的所有内容——我会补充很多提议，鼓励他们将学到的思想和概念应用在学习主线之外的其他许多方向上。为此，我努力使所有的陈述都尽可能准确，指出在每一种情形下，公式和思想是如何融入物理学的体系中的，以及——当他们掌握了更多的知识以后——已知的知识体系是怎样被修正的。我还认为，对于这样的学生来说，很重要的一点是指出哪些内容是他们应该能从以前讲过的内容中推导出来的，如果

他们足够聪明的话，他们也将知道哪些内容是作为新知识被引入的。

另一件令费曼感到兴奋的事是，他可以将物理学与其他科学联系起来，以此来表明物理学并不是一座孤岛。他介绍了色觉生理学，以及自己在学生时代就非常感兴趣的机械工程的应用，当然，他也介绍了他自己的发现。

物理系意识到，费曼的课带来了一些独特的变化，费曼也获得了极大的支持和鼓励。每周，他都会与其他教员开会，这些教员在马修·桑兹和罗伯特·雷顿（Robert Leighton）的指导下，被指派去设计问题环节和额外的复习课来帮助学生。由于费曼的教学没有依照任何教科书，所以这些会议很有必要；而这些指导者和助教不得不全职工作，以便跟上进度并整理出合适的教学材料来作为课堂的补充。

在加州理工学院大报告厅里发生的事情很快就传开了，研究生和教员们陆续前来旁听，与此同时，惊恐万分、不堪重负的本科生们却不再来了。或许只有在加州理工学院这样的学校才会发生这样的事情：虽然很多学生无法通过他的考试，但是学院还是鼓励费曼继续讲授第二年的课程。

费曼的讲座也被录了下来，以便桑兹和其他同事（主要是雷顿）录入和编辑。最终，一套三卷本的“红皮书”在世界各地出版发行。在现代物理学史上，还从未有人如此全面和如此个性化的方式，从头开始重新构造和组织关于物理学基本原理的整个知识库及其表述。这一点也在这套书的名字中得到了体现：《费曼物理学讲义》（*The Feynman Lectures on Physics*）。

这样一个书名意义重大。它为一位科学家赋予了独特的地位，我甚至想不出还有谁（至少是在物理学领域）可以获得这样的命名。费曼正在成为物理学偶像，这一书名不仅说明了这套书的性质，也表明了费曼在物理学世界中即将占有的特殊地位。

最终，费曼的课程只能说成功了一半。即使是在加州理工学院，能理解课堂上所有内容的学生也寥寥无几。然而，随着时间的推移，那些有幸参加课程的人对这段记忆有了更加成熟的反思。许多从前的学生都视这段课堂上的时光为自己一生中难得的经历，如诺贝尔奖得主道格拉斯·奥谢罗夫（Douglas Osheroff）后来所言："这两年的学习经历是我受教育过程中非常重要的一部分。虽然我不能说自己全听懂了，但是我认为它对建立我的物理直觉贡献很大。"

虽然加州理工学院的本科生作为"小白鼠"可能遭受了打击（桑兹对这一观点提出了异议，并认为大多数学生在某种程度上都有所进步），但《费曼物理学讲义》却成了任何想成为物理学家的人的必读书目。我记得我自己在读本科时就买了一本，每次试读一点儿，很担心自己能否真正掌握所有的材料，满心期望着我们这里的某位教授会使用这本书。然而并没有人使用它，这对我来说也许是幸运的。大多数尝试过使用此书作为教材的人都发现效果欠佳，对普通的物理课堂而言，这部教材的难度太大，也太具革命性。

虽然如此，这套书一印再印，2005年出现了新的修订版，而且每一年都会有一批新生买下这套书，翻开书页，开始体验一个全新的世界。

然而，对于费曼、桑兹和雷顿来说，遗憾的是，这套书的全部版税收入都流向了加州理工学院（费曼的家人后来起诉了加州理工学院，因为学校未经授权便将其中一次讲座的内容整理成了一个"书+录音带"的套装）。后来，在被誉为物理学巨人之后，费曼向他的朋友——物理学家、作家菲利普·莫里森（Philip Morrison）表达了一种同病相怜的感叹："我们是物理学巨人，商业侏儒吗？"

在教授这门课的同时，费曼广泛参与了大量的公众活动，他富有魅力的个人风格开始在物理学领域之外掀起风浪。早在1958年，费曼就已经同意在华纳兄弟正在制作的一档电视节目中担当顾问。在关于这档节目的一封信中，他提到了他在大众传播方面的经验和他的理

念：“有一种观点认为，电影工作者懂得如何呈现这些节目，因为他们在娱乐方面很在行，而科学家则不行。这种观点是错误的。他们没有在观看所有电影后向别人解释其中蕴含的思想的经验，但是我有。我是一位成功的大众物理学讲师。题材的刺激性、戏剧性和神秘感是娱乐节目真正的玄机所在。人们喜欢去学东西。能够理解一些此前从未理解的事物，会使他们感受到极大的乐趣。”

大约在那个时候，他还录制了第一次（就我所知是第一次）电视采访，并在格温妮丝抵达美国之前不久播出。上电视显然令他感到兴奋，他向格温妮丝建议：“如果你提前两周来，我敢肯定会有很多事情等着你做。6月7日我将在电视上接受一位新闻评论员的采访，可能会有很多信要回复。”这次采访堪称经典，其质量和智慧深度远超当今的访谈类节目。但是因为节目中涉及了一些关于宗教的直白讨论，电视台决定在宣传档期之外的另一个时段将其播出，因而观众较少。

费曼担任顾问的电视节目《关于时间》最终于1962年在美国全国广播公司（NBC）的电视台播出，在观众之中引起了巨大的反响，进一步扩大了费曼在大众中的知名度。鉴于费曼在面向非专业听众演讲时的高超技艺，他受邀在康奈尔大学进行了著名的“梅森哲讲座”。这一系列的6次讲座非常著名，其内容被汇编成了一本名为《物理定律的本性》的佳著。（这就是我暑期学校的物理老师为了激发我对物理学的兴趣而向我推荐的那本书。）这些讲座也被制成了视频，最近比尔·盖茨购买了它们的版权，以便让更多的人在线观看。（盖茨称，如果他在从哈佛退学之前能够看到这些影片，那么他的人生可能会有所不同。）这些影像资料比有关费曼的任何其他图像或文件都更加真实地呈现了费曼其人——顽皮睿智，活跃兴奋，魅力十足，精力充沛，坦白直率。

终于，在1965年10月21日，费曼“封神”，从此奠定了他在科学界和普通大众心目中的永久地位。费曼、朝永振一郎和朱利安·施温格因他们“在量子电动力学领域的基础性工作，对粒子物理学产生的深远影

响”而共同获得了1965年的诺贝尔物理学奖。像其他诺贝尔奖得主一样，费曼的生活被永远地改变了，他对此深感忧虑。毫无疑问，他喜欢成为名人，但是他不喜欢装腔作势，而且由于小时候受到了父亲态度的熏染，他对任何荣誉头衔都不信任。在这一点上，他始终言行一致。当他年纪轻轻从麻省理工学院毕业时，他就认定荣誉学位是愚蠢的——那些被授予荣誉学位的人并没有完成获得该学位所应做的工作。所以，他拒绝接受任何授予他的荣誉学位。20世纪50年代，他被享有盛誉的美国国家科学院遴选为院士，对许多科学家来说，这是他们从同行那里所能获得的最高认可。但自1960年起，费曼开始了从美国国家科学院辞职的漫长而复杂的过程，因为他认为，美国国家科学院的主要工作就是决定谁有足够的名望加入，谁不够格。（多年之后，卡尔·萨根被拒绝入会，成为一个著名的事件。许多人认为，至少在一定程度上，他没有被选上院士是因为他在科普工作上投入了太多精力。）费曼不再将其视为自己的荣誉之一（比如在1962年，他要求NBC电视台的工作人员在节目中将这一称号从他的简介中删除），但是美国国家科学院在10年后才最终通过了他的辞职申请。

我们很难知道费曼的态度究竟有多严肃，但是他后来说，出于相同的原因，他曾一度考虑拒绝诺贝尔奖——他才不在乎瑞典皇家科学院的某人是否认为他的工作“高贵”[注]呢。正如他的那句名言：“发现的乐趣即是奖赏。”但他很快意识到，拒绝领奖将引发更广泛的公众关注，而且可能会给人一种他认为自己“太棒”而诺贝尔奖配不上他的印象。他声称，诺贝尔奖委员会应该在做出决定之前悄悄通知获奖者，并给他们时间安静地退出。据费曼说，有此想法的不止他一人，他的偶像狄拉克也有同感。

尽管自己心存疑虑，但费曼显然觉得，这个奖项在一定程度上代表着一种肯定。正如他曾经的学生阿尔伯特·希布斯（Albert Hibbs）所说，如果没有获奖，他的感觉可能会更糟。他也喜欢这个奖项和其他荣誉带给他的声望，其中一个很重要的原因是，有了这些声望，他就可以更自由地去按照自己的意愿行事了。

费曼十分担心在官方仪式上出丑，也为弯腰鞠躬、穿着礼服以及面向着瑞典国王倒退行走而忐忑不安，但不管怎样，他还是出席了颁奖典礼，并准备了一篇精彩的演讲稿，真实地讲述了他在探寻如何驯服量子电动力学中的无穷量过程中的心路历程。然而甚至到了1965年，费曼仍然觉得他倡导的重正化的方法只是一种掩盖无穷大问题的手段，而无法彻底解决问题。

由于诺贝尔先生遗嘱的随意性，在奖项的授予方面经常会遇到一些问题。在任何领域，同一奖项的获奖者不得超过三人。对于这次的情形来说，很明显，朱利安·施温格、弗里曼·戴森和朝永振一郎都有资格分享这一奖项，那么为什么戴森没有获奖呢？他非常巧妙地证明了，推导出QED合理形式的两种看似完全不同的方法是等价的，并在此基础上提供了一份指南，向整个物理学界介绍了如何进行正确的计算。前文提过，戴森实质上是在费曼自己撰写论文之前就在论文中展示了费曼的研究结果。而且，他用自己的研究向全世界证明了费曼的方法并非权宜之策，与其他方法相比，费曼的方法更有依据，在物理上更加直观，且在计算上更加简便。因此，正是戴森帮助整个世界理解了量子电动力学，同时确立了费曼的方法，使之最终得以发展成熟。

戴森本人对没有拿到诺贝尔奖一事不曾有过微词。相反他后来曾说："费曼取得了重大的发现，而我仅仅是做了宣传工作。我在事业上已经得到了很好的回报——我在学院里找到了一份美妙的工作，衣食无忧，所以我没有什么可抱怨的！而且，我认为这一结果是完全正确且合理的。我想说，费曼是诺贝尔奖历史上最当之无愧的获奖者之一。"

---

1. 费曼很看重V–A理论，认为这是他第一次发现一个全新的定律，而不是"得出对别人理论的更有效的计算方法"或者"得出一个具体问题的解"。他为这一"新发现"而感到激动和满足。但盖尔曼对此态度不甚理解，他认为费曼"关于量子力学的新观点可能就

是一个重要的定律，可能只比量子力学通常的形式更重要而已”，并且认为费曼将V–A视为自己的原创不甚合理，因为费曼已经知道其他人也有相近的想法。——译者注

2. “诺贝尔”（Nobel）与英语的“高贵”（noble）拼写相近。——编者注

第15章

拧宇宙的尾巴

我认为我有了正确的想法，去做疯狂的事情……

——理查德·费曼

1957年到1965年的这几年是理查德·费曼人生中的一段过渡期。从个人角度来说，他从一个风流浪子变成了有妇之夫，从孤独的游荡者变成了顾家的丈夫和父亲（他从未停止探险，但是现在，他总是和家人共同探险）。在事业上，他不再只为眼前之乐而忙于物理学前沿的紧迫工作，而是开始向世界回馈他多年来思考自然所获得的智慧（尽管他从来不会说自己拥有了智慧）。

与此同时，他已成为物理学界最著名、最有趣的演说家和教师之一，在某种程度上，也成为物理学界的良心。他保持着敏锐的意识，尽自己所能确保他的同事和广大公众不会忘记什么是科学、什么不是科学，并探究科学可以获得怎样的兴奋感，而过分解读科学信号、毫无根据的主张或者与科学完全脱节将带来怎样的谬论。他强烈地感觉到，科学需要某种智力上的诚实，如果这一点能得到更广泛的理解和实践，世界也将变得更加美好。

这并不是说费曼其人发生了根本性的改变。他对物理学的各个方面仍然保持着极大的兴趣，而且，就像我刚刚提到的，他仍然在寻求冒险，只不过换了一种方式。除了夫妇二人的异国旅行，他还从事了两项活动，就其本性而言，这两件事可称得上是比较高尚了。一件事是他几乎每天都在帕萨迪纳的一家脱衣舞俱乐部里进行理论计算，每当计算进展不顺时，他就观察眼前的女孩子。另一件事则是将自己长

期以来对绘画和裸体女性的兴趣结合起来，进行艺术创作。事实上，他在这方面颇有成就，在这一点上他与年轻时反差很大。年轻时他曾嘲笑过音乐和艺术，但到了中年，这两者都被他接受了。同样与早年形成鲜明对比的是，他在20世纪60年代对游览伊莎兰（Esalen）这样的“新时代”[注]机构产生了极大的兴趣。用他的话说，在伊莎兰他既可以欣赏风景，也很高兴可以借机让其他参与者不再相信那些“胡说八道的童话故事”。他无法容忍那些滥用物理学概念（譬如量子力学）来证明“万事无常”的理念的人，然而相较之下，裸体浴的诱惑，以及与完全不同类型的个体进行互动的魅力，或许占了上风。

随着名气的增长，他开始极力维护自己从事物理研究工作的时间。他要确保自己不会成为传统意义上的“伟人”，不会被一大堆他无时无刻不想要逃避的行政责任拖累。据称，在费曼获得诺贝尔奖之后，他甚至在访问日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）时与维克托·魏斯科普夫打了个赌，称自己在10年内都不会就任“责任重大的职位”——在他眼里，这类职位“由于职位本身的性质，迫使在位者向他人发号施令，去执行某些行为，但事实上，在位的人对自己指示别人去完成的事情并不了解”。结果自不必说，费曼赢了这个赌局。

日渐增长的名气激发了他性格中的另一种倾向，虽然他曾因此而获益，但从长远来看，如果不是因为这种倾向，他本可以在引领物理学的新发现方面取得更大的成就。费曼越来越相信，为了开辟新的道路，他需要忽略其他人正在进行的工作，尤其是不要关注“当下流行的问题”。

物理学研究毕竟属于人类的一项社会活动，在任何时期，对于什么是“热点”问题，以及哪个方向最有可能带来对问题的新的深入理解，人们往往会形成共识。一些人认为，这种一时的流行存在很大的问题，比如在过去的25年中，物理学界许多人对弦论非常着迷。人们越来越困惑于弦论究竟能够预测自然界的什么问题，却忽视了一个更重要的问题，即这种在数学上极具吸引力的理论缺乏与经验世界的直

接联系。（尽管如此，弦论的数学方法已经为如何进行计算，以及如何诠释更传统的物理学结果，带来了许多有趣的见解。）

趣味相投的人不可避免地会为相似的事物而感到兴奋。然而最终，科学风尚并不重要，因为首先，在所有人都追逐同一课题的情况下，一切行为都不可避免地会以最快的速度暴露其缺点和优点；而且，一旦自然界指出了正确的方向，科学家们弃船逃生的速度会比暴风雨中的老鼠更为迅速。

因此，为了人类科学的健康发展，必须要有一些科学家置身潮流之外。费曼看重的正是这一点，且几乎痴迷于此。他天资聪颖，博学多识。如果必要的话，他能够重新发明几乎一切现有理论，并在此过程中不断改进。但是，全盘重来需要花费不少时间，且这么做往往不值得。

他不仅有能力选择这样的道路，也常常觉得他必须这样做。这既是他的优点，也是一个缺点。他实际上并不相信任何理论，除非他用自己的方法从最基本的原理出发将其推导出来。这意味着，他比大多数人更加深入和透彻地理解了大量概念，且他掌握了一套了不起的技巧，可以用这些技巧找到解决各种问题的神奇方法。然而，这也意味着他不会注意到其他人的非凡成就，这些成就本可以在新的方向上启迪他的工作，让他比完全依靠自己走得更远。

悉尼·科尔曼（Sidney Coleman）是一位才华横溢、备受尊敬的哈佛大学物理学家。20世纪50年代，科尔曼曾就读于加州理工学院，师从盖尔曼，在整个职业生涯中一直与费曼保持着交流。科尔曼曾说："我确信迪克认为这是一种美德，是高贵的。但我不这么认为。我认为这是自欺欺人。其他人也不都是笨蛋……我知道一些人，他们其实很有创见，而且也不古怪，但是他们在物理学领域所取得的成就并没有达到应有的水平，因为在某个关键时刻，他们更注重是否原创，而不是正确。迪克可以侥幸逃脱这样的结局，因为他实在太聪明了。"

费曼确实很成功。但倘若他偶尔也将自己的研究建立在他人基础之上，而不是另辟蹊径，他是否会更有建树？这一点，我们永远无法得知。不过，客观评判他自1960年左右开始对科学的贡献，可以发现有几种趋势在不断重复。他会探索一个新的领域，发展出一套非凡的原创数学技巧和物理见解，最终帮助他人完成最重要的发展，从而带来一系列的重大发现，并从实质上推动现代理论和实验物理学几乎所有领域的进步。这其中包括了他在凝聚态物理学方面的工作，以及我们对弱相互作用和强相互作用的理解，还有当前量子引力和量子计算工作的基础。但是他本人并没有做出发现或取得任何奖项。从这个意义上说，几乎没有哪个现代科学家像他一样，继续推动物理学向前发展，开辟了新的研究领域，形成了关键的见解，并在前人从未涉足之处创设兴趣，他倾向于从背后或者从侧面发挥引领作用。

我不清楚这是否对他造成了困扰。虽然他天生喜欢炫耀，但就像我所描述的那样，最终，他更在意的不是某个工作是否由自己原创，而是自己的观点是否正确。如果他的工作引导他人发现了新的真理，他可能会在很长一段时间内对他们的结果持怀疑态度，但最终“给黑暗带来光明”的满足感会使他深感愉悦。费曼将目光锁定于远离主流物理界的疑难问题，更增加了他给人启迪的机会。

费曼偏离主流道路的第一次冒险始于1960年前后，当时，他渴望了解如何建立量子引力理论。他对此感兴趣的理由很充分：第一，虽然迄今为止考虑过这个问题的人都还没有研究出量子引力理论，但此前，当其他人陷入困境时，他就已成功地发展出了自洽的电磁学量子理论，而且他认为他在QED方面的经验可能会在某处发挥作用；第二，长久以来，爱因斯坦的广义相对论都被视为继牛顿理论之后最伟大的科学发展，毕竟它是一种描述引力的新理论。但是当人们考虑这一理论在小尺度上的作用时，它似乎是存在缺陷的。第一个能够修正这一理论的人无疑会被看作爱因斯坦的合格继承者。但是对费曼来说，最具吸引力之处或许在于没有其他人，至少是没有哪位重要的大人物，在研究这个问题。1962年，费曼在华沙参加一个关于引力的学

术会议时曾给妻子写了一封信，他在信中写道："这个领域（因为没有实验）并不活跃，从事该领域研究的顶尖人物少之又少。"

这可能有点儿言过其实，但事实上，自1915年爱因斯坦提出经典场方程以来，广义相对论已经成为一个独立的研究领域。因为广义相对论表明，物质和能量会影响空间本身，使它能够弯曲、伸展和收缩，这种空间构型会影响物质和能量的后续演化，而这反过来又对空间产生影响，如此往复。因此，这一理论在数学和物理上都远比牛顿的引力理论更为复杂。

为了解释从宇宙的动态变化到恒星燃尽核燃料的最后时刻的行为等现象，人们进行了大量的工作以找到广义相对论方程的数学解。这些方程非常复杂，它们的物理学解释也让人十分困惑，因而相关研究人员需要有巨大的创造力和绝佳的数学能力，当时有一小部分专家已经投身于这项研究，开始探索解决这些问题的新技巧。

为了了解实际情况究竟有多复杂，科学家们花了整整20年的时间，走了不少弯路，陷入了许多困境，也犯了大量的错误（其中包括爱因斯坦本人的一些著名错误），才认识到广义相对论与静态、永恒的宇宙模型是不相容的，而后者正是当时人们所偏爱的宇宙科学图景。当时的宇宙模型认为我们的星系被静态的真空区域包围，为了让这样的宇宙得以存在，爱因斯坦引入了他著名的宇宙学常数（后来他称之为自己一生中最大的错误）。

1924年，苏联物理学家亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）首次写出了膨胀宇宙的方程。但出于某种原因，这些方程基本上被物理学界忽视了。比利时牧师、物理学家乔治·勒梅特（Georges Lemaître）独立地重新发现了这些方程，并于1927年将它们发表在了一本鲜为人知的杂志上。勒梅特的工作并没有引起广泛关注，但爱因斯坦显然注意到了，并写信给勒梅特："你的计算是正确的，但是你的物理糟透了。"

20世纪30年代，在埃德温·哈勃（Edwin Hubble）通过遥远星系的运动观测到宇宙膨胀之后，勒梅特的论文终被翻译成英文，并受到包括爱因斯坦在内的研究者的广泛认可。1931年，勒梅特在《自然》杂志上发表了一篇著名的文章，概述了他的“原始原子”模型，该模型最终被称为“大爆炸”。最后，霍华德·罗伯逊（Howard Robertson）和阿瑟·沃克（Arthur Walker）通过严格计算，于1935年证明了如果要求宇宙均一且从各个方向上看都相同（在当时，人们已经认识到我们的银河系并不是宇宙中唯一的星系。而且从任何方向看过去，宇宙空间都是均匀的，到处都有星系存在。据估计，在我们可观测的宇宙范围内，大约有4 000亿个星系），唯一符合广义相对论要求的宇宙模型就是弗里德曼和勒梅特所描绘的大爆炸造成的膨胀宇宙。自此，大爆炸理论开始成为最广为接受的理论宇宙学模型。但实际上，自费曼开始他的研究起，又过了30年的时间，科学家才开始认真地探测大爆炸产生的实际物理学信号，而宇宙微波背景辐射的发现使这一理论具有了明确的经验基础。

人们花了20年的时间才厘清广义相对论的宇宙学意义，但在所有与引力相关的情形中，最常见的球形物质外壳的引力坍缩现象造成了更长久的困惑，至今仍未得到充分理解。

在爱因斯坦发展出广义相对论后，仅仅间隔数月，德国物理学家卡尔·施瓦西（Karl Schwarzschild）便写出了一组标准解，描述了宇宙空间的性质，以及由一个球形质量体产生的外围引力场的分布。然而，该方程在距离分布中心的一个有限半径范围内产生了无穷大的结果。这一半径现在被称为“施瓦西半径”。在当时，人们并不理解这个无穷大意味着什么，这究竟是简单的数学处理的产物，还是反映了在这一尺度上发生的一些新的物理学现象?

著名（后来获得了诺贝尔奖）的印度科学家苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）研究了恒星等真实物体的坍缩，他认为，对于质量超过太阳质量1.44倍的恒星来说，没有任何已知的

力能够阻止它们坍缩到这个半径或更小的范围。然而，著名天体物理学家阿瑟·爱丁顿（此人1919年对日全食的观测为广义相对论提供了第一次实验验证，并使爱因斯坦声名鹊起）强烈反对这个观点，并对之不屑一顾。

最终，罗伯特·奥本海默在稍微改进之后，证明了钱德拉塞卡的结果是正确的（约大于等于3个太阳质量）。但是问题仍然存在：当恒星坍缩到施瓦西半径以内时，究竟发生了什么？这个理论一个显而易见的最奇怪的启示是，从一个外部观察者的角度来看，随着大质量物体坍缩到接近施瓦西半径的尺寸，时间似乎会变慢，这样一来，在进一步坍缩之前，物体似乎会被“冻结”在这一点，人们因此称之为“冻结之星”（frozen star）。

因为一些诸如此类的原因，大多数物理学家认为，从物理学的角度来看，物体不可能坍缩到施瓦西半径以内，物理学定律会在物体到达施瓦西半径之前的某个时刻阻止其坍缩。然而，到1958年，科学家们意识到，与施瓦西半径有关的明显的无穷大量是用于描述这个解的坐标系统的数学产物；当物体穿过这个半径时，不会发生任何不符合物理学定律的事。现在这个半径被称为“事件视界”（event horizon），因为一旦位于其内部，里面的物体就与外界失联了。

虽然在事件视界上不会发生任何意外情况，但1963年，罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）证明了任何落入事件视界之内的事物都注定坍缩到位于系统中心的密度无限大的“奇点”（singularity）上。可怕的无穷大突然再次出现，这一次不仅出现在对粒子相互作用的计算中，而且出现在宇宙空间本身的性质中。据推测（目前还没有得到证实，而且最近确实有人通过初步数值计算提出了几个反例），所有这些奇点都被视界遮挡，与外部观察者隔离开来，因而无法被直接观测到。如果这是真的，将会掩盖这样一个物体内部实际发生的问题，但显然关键的物理问题仍没有得到解决：这样的奇点是否存在？

费曼的导师约翰·惠勒早先曾激烈地辩称，在一个可感知的宇宙中，在施瓦西半径之内发生坍缩是不可能的。但在1967年，他承认了这种可能性，并赋予这类坍缩的物体一个令人着迷的名字——“黑洞”（black hole）。不知是不是人们被这一名称激起了兴致，在我们对小尺度和强场引力的理解方面，“黑洞”仍然是所有现代争议的中心。

当费曼将他的注意力转向这一领域时，理论物理学家对引力的研究主要集中在与爱因斯坦方程的经典解的解释和引力坍缩的性质相关的问题上。也许最引人注目的地方在于，对引力的研究演变成了物理学中一个几乎独立且与其他研究没有交集的领域。归根结底，是因为爱因斯坦似乎已经证明了，引力与自然界中其他所有力都截然不同。引力来自空间本身的扭曲，而其他力的作用方式似乎很不一样——比如，基于在空间中移动的基本粒子的交换。甚至连教科书都倾向于将广义相对论视为一个完整独立的领域，它可以与几乎所有其他物理领域分开来理解。

然而，费曼正确地认识到，这种分离不是自然所为。在小尺度下，量子力学起主导作用，而最终，如果人们试图在小尺度下理解引力，就需要使用费曼和其他人发展的理论工具，来理解经典理论是如何与量子力学原理统一起来的。比如说电磁相互作用，表面上看起来它与引力相互作用的形式相同，是一种长程作用力，随着距离平方的增加而减小到无穷小，而它可以通过费曼等人建立的理论工具与量子理论相容。因而，科学家或许可以通过费曼和其他人处理QED一样的方式来处理引力，以获得宝贵的新观点。

20世纪50年代中期，费曼开始认真思考这些问题，当时他刚刚完成了自己在QED方面的研究。在1954年圣诞节期间，他就这些问题与盖尔曼进行了探讨。那时他已经取得了很大的进展。然而，直到1962至1963年，在他为加州理工学院的研究生讲授一门为期一年的相关课程的过程中，他才完成并正式表述了自己的想法。多年以后，他在这

方面的讲义被编成了一本书，理所当然地被命名为《费曼引力讲义》（*The Feynman Lectures on Gravitation*），于1995年公开发行。这一书名尤其恰当，因为在讲授这门研究生课程的同时，正值他准备并教授他那门著名课程的第二年，更广为人知的《费曼物理学讲义》就是以这门课为基础的。毫无疑问，在这一时期结束时他已经精疲力竭了！

1963年，费曼在一篇总结自己研究结果的科学论文中阐述了他的研究动机，并承认在量子领域研究引力并不合适，因为在当时，乃至今天，引力和量子力学的关系仍然无法用任何可能的实验进行验证。如费曼在论文中所说："我对它（引力的量子理论）的兴趣主要在于自然界中的一部分与另一部分之间的关系……我限制自己不讨论量子几何的问题……我并没有尝试去讨论关于其他场的量子场论中尚不存在的问题。"

在当前环境下，人们对统一自然界中的几种不同的力怀着极大的兴趣，因此很难认识到费曼的理论在当时所具有的革命性意义。认为引力可能没有那么特殊或者独立，这种想法在当时几乎是异端邪说，对在这个领域内的科学家们来说尤其如此，他们视引力为一颗奇珍异宝，需要用普通物理学家无法使用的特殊工具来进行研究。可以想见，费曼对于这种陈腐的观点没有什么耐心，这与他对科学的所有信仰背道而驰。在华沙参加第二届引力会议期间（第一届会议于1957年在北卡罗来纳大学教堂山分校举行，那届会议或许更令人愉快些），他在给格温妮丝的信中写道：

> 在这次会议上我一无所获……这里有一群笨蛋（126个）——这对我的血压不好——提出并严肃地讨论一些无比愚蠢的事情，我在会场外就陷入了争论……每当有人问我问题或者向我介绍他的"工作"时。这些人往往是如下情形中的一种：第一，完全不可理解；第二，含糊不清；第三，对一些显而易见、不证自明的正确观点进行冗长而艰深的分析，并将其作为一个重要的发现；第四，由于自己的愚蠢而发出声明：认为一些明显正确、多年来被人接受并

经过验证的结论实际上是错误的（这是最糟糕的——没有什么论据能说服一个白痴）；第五，企图去尝试一些很可能不可行，但肯定毫无用处的事情，并且最终被证明是错误的；第六，明显是错的。这几天有许多“领域内的活动”，但是这些“活动”主要展示了其他人之前的“活动”导致了错误，或者毫无用处，或者带来了一些有希望的东西……提醒我，以后再也不要参加引力学会议了。

费曼首先注意到，引力作用甚至比电磁作用还要弱。那么，正如我们可以先考虑经典理论，然后逐步加入小的量子修正来理解电磁作用的量子理论一样，我们也可以借鉴这一研究过程来探讨引力的问题。因此，我们可以研究超越电磁相互作用中的最低阶近似时所产生的无穷大量是否也会在引力中出现，是否可以像在QED中一样将这些无穷大量移除，以及是否会出现新的复杂情况来帮助我们洞察引力的本质。

在电磁相互作用中，力产生于带电粒子和电磁场（其量子为光子）之间的相互作用。值得注意的是，就我所知，费曼是第一个提出人们可以像处理其他量子理论一样处理量子引力的人——鉴于电磁作用与引力作用在表面上存在诸多相似之处，人们对电磁学量子理论的处理方式尤其具有参考价值。为此，他提出了一个引人注目的观点：假如爱因斯坦没有提出广义相对论，那么是否会有其他人，仅仅通过思考量子粒子与量子场相互作用的经典极限，就推导出爱因斯坦的公式呢？在这方面，费曼并不是第一个探索这种可能性或者得出积极结论的人——事实上，史蒂文·温伯格在1964年就对这一问题进行了更广泛和深入的探索，并在他于1972年出版的关于引力与宇宙学的优秀著作，以及1979年发表的文章中对相关内容进行了详细阐述。但费曼的原创性的分析创造了一套现代的思维方式，让后来的人们得以重新评估该理论。

费曼的论断很引人注目：抛开一切几何学计算，以及那些似乎是广义相对论基础的关于空间和时间的迷人概念，如果我们考虑一个无

质量粒子的交换行为（恰如传递电磁相互作用的无质量粒子光子），而且被考察的无质量粒子具有的量子化自旋为2，而不是像光子那样自旋为1，那么在经典极限下，由此产生的唯一自洽的理论就必然是爱因斯坦的广义相对论。

这确实是一个令人震惊的论断，因为它表明，广义相对论与描述自然界中其他力的理论并没有太大的不同。与其他理论一样，广义相对论也可以通过基本粒子的交换来描述。在此基础上，所有的几何学过程都可以自然而然地形成。事实上，在实际的声明中，费曼对何谓“自洽”的表述当中存在一些不同以往的细微差别，但这些差别是非常细微的。而正如我们在前文中提到的，仅仅通过无质量的自旋为2的粒子与狭义相对论中出现的空间对称性之间相互作用的性质，温伯格就在更广泛的条件下证明了这一主张。

但撇开这些细微之处，这一关于引力和广义相对论的新图景，在广义相对论和物理学其他领域之间搭建了一座全新的桥梁。如费曼所愿，这表明借助量子场论的工具，人们不仅可以理解广义相对论，而且也能够将引力与自然界的其他力统一起来。

首先，这些无质量的、自旋为2的粒子是什么？它们在自然界中对应的是什么？回想一下电磁场的量子光子，就正好是经典电磁波的量子化版本。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦首次表明电场和磁场的波是由电荷的振动引起的，这便是电磁场产生的根源。进入我们眼睛的可见光，射向我们皮肤的太阳热量，传入我们收音机的无线电波，以及被应用于我们手机的微波，都是电磁波的不同形式。

在提出广义相对论后不久，爱因斯坦便指出，质量作为引力之源，可以产生和电磁波类似的效果。如果具有一定质量的物体以恰当的方式移动，它就会发射出一种新型的波——引力波。顾名思义，这种波是空间沿着一个方向不断压缩和延展形成的，而且这种波同光子一样都以光速传播。1957年，当费曼首次在物理学会议上讨论他的想法时，许多听众甚至质疑引力波是否存在。（事实上在早些时候，爱

因斯坦本人的一篇论文曾因否认引力波的存在而被H. P. 罗伯逊批评，以至未能发表。）然而，约瑟夫·泰勒（Joseph Taylor）和他曾经的学生拉塞尔·赫尔斯（Russell Hulse）令人信服地证明了，一对互相绕转的中子星正以广义相对论所预测的从该系统发射的引力波的精确速率损失能量，这一发现使他们共同获得了1993年诺贝尔物理学奖。由于引力太微弱，科学家们尚未直接探测到引力波[注]，但已经设计了相关的大型地面实验，且正计划在太空中建造一台非常灵敏的引力波探测器。

只有质量分布以非球对称方式发生改变的物体才能发射引力波。物理学家将这种分布发出的辐射称为四极辐射（quadrupole radiation）。如果人们想要通过将粒子与发射的波联系起来以编码这种方向上的各向异性，这些基本“量子”的自旋必须是2，这就是费曼首先探索这种可能性的原因。引力波的量子化单位被称作“引力子”（graviton），其性质与光子类似。

就像电力和磁力由电荷间交换的光子而产生那样，引力也可以简单地由有质量的物体之间交换引力子而产生。在证明了这一点之后，费曼开始原封不动地使用在发展QED过程中曾对他有很大帮助的分析方式来计算引力过程中的量子修正。然而，这并非易事。广义相对论比QED要复杂得多，因为在QED中，光子与电荷之间的相互作用并不是直接发生的。然而，因为引力子与任何形式的质量分布或能量分布都会发生作用，而且引力子能够携带能量，所以引力子之间也存在相互作用。这种额外的复杂性几乎改变了一切，至少使得几乎所有问题都更加难以计算。

费曼发现仅像处理QED那样处理广义相对论，并不能在不产生任何恼人的无穷大的情况下，为引力与物质的相互作用找到统一的量子理论。虽然研究者们已经提出了包括弦论在内的若干备选，但到目前为止，这样一个明确的理论尚未出现。虽然如此，但自费曼进入这一领域开始他的研究工作以来，50多年间，科学家们——从费曼本人到

施温格，到斯蒂芬·霍金以及一批后来者——在该领域所取得的每一项重大进展，都是建立在费曼的方法，以及他在探索过程中所开发的特定工具的基础上的。

以下是一些例子：

黑洞与霍金辐射。对于想要理解引力本质的物理学家来说，黑洞可能仍然是最大的理论难题，同时也带来了最出人意料的发现。在过去40年中，研究人员已经逐渐掌握了宇宙中存在大质量黑洞状物体的提示性的观测证据，从高能类星体的引擎，到星系（包括我们所处的星系）中心存在的几百万到几十亿个太阳质量的天体，量子尺度上的演化细节控制了黑洞坍缩的最后阶段，造成了一些令人意外的结果，同时也引发了争议。其中令人最为惊讶的是，在1972年，斯蒂芬·霍金在探索黑洞事件视界附近可能发生的详细量子力学过程时，发现这样的演化过程会导致黑洞以所有基本粒子的形式向外辐射能量，包括引力子；黑洞仿佛是热的，其温度与质量成反比。这种热辐射的形式本质上与坍缩形成黑洞的物质性质无关，它会使黑洞失去质量，并且最终可能完全蒸发！为得出这一结果所使用的近似方法，正是基于费曼首次探索引力的量子力学形式时所采用的方法，即先近似认为背景空间是固定且几乎平直的，并考虑量子场，包括引力子在空间中的传播。霍金的这一结果不仅与常识性的经典思想相悖，而且对我们在考虑引力的情况下理解量子力学提出了重大挑战。这一有限温度的来源是什么？如果黑洞最终会蒸发，那么落入黑洞的信息会怎样？在黑洞中心的奇点，传统量子场论不再起作用，那里应该是什么状态呢？在过去的40年中，最伟大的理论物理学家们在这些重要的概念和数学问题的推动下展开了研究。

弦论及其发展。在努力处理量子引力理论中无穷大量的过程中，科学家们在20世纪60年代发现，如果考虑环状振动弦的量子力学行为，就会自然而然地产生一种振动，正适用于描述无质量的、自旋为2的激发。这使人们认识到，使用费曼的计算结果（参见上文），爱

因斯坦的广义相对论可能会自然地出现在结合了这种弦状激发的基本量子理论中。这种认识反过来也揭示了这样一种可能性，即这种理论可能是一种真正的量子引力理论，费曼在将引力理论作为量子理论进行探索的过程中产生的所有无穷量都可能被驯服。1984年，研究者们提出了几个可能消除所有无穷大量的候选弦论，从而在物理学界掀起了自量子力学发展以来或许是最大的一轮理论热潮。

虽然这种可能性令人兴奋，但其中也存在一个小问题。为了使不含有无穷大量的自洽的量子引力理论在数学上成为可能，作为基础的弦状激发不能存在于仅有的四个维度的空间。它们至少应在十维或十一维的空间中“振动”！这样一个理论如何与我们所感知的四维世界相容呢？额外的六个或七个维度会发生什么？如何才能开发出一种数学手段来对它们进行一致的处理，同时继续探索我们所处世界中的现象？如何才能开发出一套物理机制来“隐藏”额外的维度？最后，或许也是最重要的一点是，如果引力能在这些理论中自然而然地产生，那么依照费曼的想法来看，在我们所处的世界中，其他粒子和力是否也能在相同的理论框架内自然而然地产生呢?

这些问题成为过去20年中理论界探索的核心问题，而研究结果只能说是喜忧参半。人们发展出了一些迷人的数学定理，为理解外在表现似乎不同，却有着相同物理学基础的量子理论提供了令人兴奋的新见解——这正是费曼所说的科学的核心目标。已有的一些有趣的数学结果或许可以帮助我们更深入地了解黑洞如何以热的方式辐射，这一过程看似丢失了信息，却仍然没有违背量子理论的核心原则。最后，弦论基于一种新型费曼图来计算涉及弦的行为的过程，使得理论学家们可以发展新的方法来归类普通量子场的费曼图，也使得物理学家们可以在封闭形式的过程中推导出解析解——如果直接进行计算，则需要对海量费曼图进行求和。

然而，事物总是祸福相依。随着我们对弦论理解的逐渐深入，我们发现它显然比我们之前想象的要复杂得多，这一理论中的关键对象

可能并不是弦本身，而是被称作“膜”（brane）的更高维度的物体，这使得我们更难推导出理论预测结果的可能范围。此外，在弦论发展的早期，物理学家曾寄希望于一个基础弦理论就能对当今实验室中所有的基础物理测量做出独一无二的明确预测，而事实却与人们的期望背道而驰。这些理论可以产生无数种可能的四维宇宙，每个宇宙都有一套自己的物理定律。如果真是这样，弦论产生的就不是“万有理论”（theory of everthing），而是“任有理论”（theory of anything）。按照费曼对科学的态度，“任有理论”根本就不是理论。

事实上，费曼在其有生之年见证了20世纪80年代重大的弦论革命，以及随之而来的大肆宣传，而他对宏大论断与生俱来的怀疑态度并未动摇。正如他当时所言：“我的感觉是——也可能我是错的——解决问题的方式不止一种。我认为摆脱无穷大量有多种手段。一个理论能够摆脱无穷大量，并不足以让我相信它是独一无二的。”费曼在他1963年发表的相关主题的科研论文的开篇即已清晰表明了他对所谓的理论预测的理解：即使是一个能做出清晰预测的理论，也可能远远超出实验验证的能力范围，而任何试图理解量子引力的努力都会遇到类似的阻碍。弦论本身如此缺乏可预测性，而弦论学家们甚至在明显缺乏实验证据的情况下还表现出不可思议的傲慢。费曼因此愤怒地说：“弦论学家们不做预测，他们只是在制造借口！”此外，他还通过阐释自己心目中定义成功科学理论的其他关键因素来表达自己的不满：

> 我不喜欢他们什么都不计算，不喜欢他们不检验自己的观点，也不喜欢他们只要遇到与实验不一致的结果就炮制一个解释，一种解决方案，然后说：“好吧，这可能是真的。”比如，这个理论需要10个维度。好吧，也许能有一种途径把6个维度卷曲起来。是的，这在数学上是可能的，但是为什么不卷曲7个维度呢？当他们写下方程的时候，方程自身就应该给出这些维度中有多少被卷曲了起来，而不是随实验结果而定。换言之，在超弦理论中，完全有理由

认为是10个维度中的8个被卷曲起来，结果只剩下二维世界，这与我们的经验完全不符。因此，这个理论是非常站不住脚的，它不会产生任何东西，大多数时候都需要编造借口才行得通。这看起来不太对劲儿。

20多年前引起费曼关注的这些问题——如果这些问题果真存在的话，自那时起已经变得越来越突出。当然，费曼对所有新的提议都持怀疑态度，包括一些后来被证明是对的东西。只有时间、更多理论方面的工作或者一些新的实验结果，才能判定他在一个问题上的直觉是否正确。

量子引力中的路径积分和“量子宇宙学”。如前所述，传统量子力学存在的问题是对空间和时间进行了区别处理。它定义了系统在特定时刻的波函数，然后给出了波函数随时间演化的规则。

然而，广义相对论的一个基本原则是，这种空间和时间上的区别，从某种程度上来讲是人为制造的。人们可以选择不同的坐标系统，在这些系统中，一个人的空间坐标可能是另一个人的时间坐标，而推演出的物理结果则不应取决于这种主观区分。在空间发生强烈弯曲（引力场很强）的情况下，这个问题变得尤为重要。在引力足够弱时，人们可以将空间看作是近似平直的，此时物理学家可以按照费曼提出的方法，将引力当作一个微小的扰动来处理，把引力作用主要归因于在固定的背景空间中运动的单个引力子之间的交换。但是，如果引力很强，时间和空间就将成为交织在一起的量子变量，在这种情况下，如果将现象发生的场景严格地区分成背景空间和时间，则会存在问题。

量子力学的路径积分公式并不要求做这样的区分。我们要做的是对所有相关物理量的所有可能性求和，并且对所有可能的路径求和，而不需要分离时间和空间。此外，就引力而言，其相关的物理量涉及空间几何结构，那么人们就必须在求和时考虑所有可能的几何结构。

费曼的方法为这样的操作提出了解决方案，但是我们根本不清楚余下的问题是否可以利用量子力学的传统公式来处理。

已经有物理学家开始使用路径积分方法来研究量子引力问题了，其中的领衔人物是斯蒂芬·霍金（以及后来的悉尼·科尔曼等人），他们把它用来发展应用于整个宇宙的量子力学，利用路径积分对各种可能的宇宙中间态进行求和，在这些宇宙中间态中，可能存在奇妙的新拓扑结构，包括“婴儿宇宙”和虫洞。这种用量子力学来处理整个宇宙的方法叫作“量子宇宙学”，其中涉及一系列全新而且困难的问题，包括如何在没有外部观察者的情况下解析量子系统，以及能否通过该系统的动力学确定它的初始条件，而不是由外部实验者强制限定。

这一研究领域显然还处于起步阶段，尤其是缺乏对量子引力的定义明确的理解。但是，正如默里·盖尔曼于费曼去世后在一篇文章中所热切希望的那样（盖尔曼知道费曼非常渴望发现新的物理定律，而不仅仅是为现有理论寻找新的表达形式——费曼曾担心自己的量子电动力学方法仅仅是一种新的表达形式而已），费曼的路径积分形式不仅仅是一种全新却等价的量子力学表述方式，而且是一种真正的基本方法。盖尔曼指出：“如果理查德知道，现在有一些新的迹象表明他的博士论文可能关系到物理学理论的一项非常基本的改进，而不仅仅是一种形式推导，他会非常高兴的。量子力学的路径积分方法可能比传统方法更加基础，因为在一个关键的领域，传统的方法可能会失败，而这种方法可能适用。这一领域就是量子宇宙学……为了理查德（和狄拉克），我更希望证明路径积分方法是量子力学的真正基础，因而也是物理理论的真正基础。”

宇宙学、平直性和引力波。我把费曼的工作中最具体的，或许也是哲学意义最浅显的部分留到了最后，因为这部分工作是最有可能让计算与实验数据直接进行比较的。费曼认为，少了这种比较，理论上的努力将是徒劳无益的。

令人惊讶的是，在费曼完成这项工作时，科学家们现在所了解的关于宇宙最大尺度的一切几乎都不为人知。然而，除了一个例外，费曼在很多关键领域的直觉都是正确的。观测宇宙学前沿的实验很快就会提供第一个直接证据，证明他将引力子作为引力场基本量子单位的描述是正确的。

费曼早就意识到了一个粒子系统的总能量恰好为零的可能性。虽然这听上去非常奇怪，但这种可能性是存在的，因为尽管从无到有地创造粒子需要正能量，但随后它们所受引力之合力则表明它们具有负的“引力势能”。也就是说，因为需要做功才能克服它们之间的万有引力，从而将它们拉开，所以它们被创造出来然后又互相吸引到一起所导致的净能量损失恰好可以补偿创造它们所耗费的正能量。正如费曼在他关于引力的讲座中所说：“想到创造一个新粒子不用耗费任何东西，这很令人兴奋。”

由此，我们似乎向“整个宇宙的总能量可能恰好为零”这一结论迈进了一小步。这样一种总能量为零的宇宙很有吸引力，因为这样的宇宙有可能诞生自虚无。我们能观测到的所有物质和能量都可能源自量子力学涨落（包括宇宙空间本身的引力量子力学涨落）。费曼考虑过这种可能性，而目前最好的宇宙演化模型，即暴胀模型，正是基于这一观点。这一模型的创立者阿兰·古斯（Alan Guth）曾说过，在这种情形下，宇宙是“免费午餐”的终极例证！

有趣的是，一个总引力能为零的宇宙在空间上是平直的。也就是说，在大尺度上，它的行为类似于光沿直线传播的普通欧几里得空间。通过对宇宙大尺度几何结构的直接测量，我们现在已经有了强有力的证据，可以证明宇宙是平直的。这是近年来宇宙学领域所取得的最令人兴奋的发展之一。然而，早在1963年，费曼就提出过类似的观点，他认为，靠引力束缚而形成的星系和星系团（宇宙中存在的最大的集合体，直径达数千万光年）的存在，意味着宇宙膨胀的正的动能与这些系统中的负的引力势能大体上相等。他是对的。

然而，在他以量子场论对引力所进行的讨论中，有一个应用似乎偏离了他通常敏锐的物理学直觉。在他的量子电动力学研究中，他和其他人都证明了“虚粒子”不仅存在，而且是理解原子性质所必需的。因而，真空并不是空的，而是充斥着沸腾的虚粒子。量子力学的定律告诉我们，人们想要考察的区域越小，短暂存在的虚粒子可以拥有的能量就越高。费曼曾经提过这一点，他说，手握成拳头时里面包裹着的虚粒子的能量，就足以支撑整个人类文明的运转。不幸的是，一些支持者和不切实际的狂想者借这一观点来宣传他们的愿望，即发明可以从真空中获取能量的装置来驱动人类文明，以此来解决我们的能源问题。

不知何故，费曼忽视了一个问题，即苏联物理学家雅可夫·泽尔多维奇（Yakov Zeldovich）于1967年阐明的一点：所有能量都受到引力作用，即使是存在于真空中的能量。如果真空具有如费曼所论述的那么多的能量，那么万有引力将大到足以使地球爆炸。因为根据广义相对论，当能量进入真空时，产生的引力是排斥力，而非吸引力。因此，平均来看，真空中的能量不可能比所有物质的能量大若干数量级，否则将产生非常大的排斥力，以至于星系永远不会形成。

不过，费曼也并非彻底错了。在过去50年间，最令人震惊的发现便是真空中确实存在能量，虽然远比费曼想象的要小，但足以推动当前的宇宙膨胀，并使膨胀加速。目前，我们尚未掌握这一现象的成因，也不了解为什么真空中不仅包含能量，并且这些能量几乎相当于宇宙中所有星系和物质的总能量。这可能是物理学界，乃至整个科学界的最大谜团。

抛开费曼的错误不谈，如果宇宙暴胀模型是正确的，即宇宙早期发生了指数级的膨胀，导致了今天平直的宇宙，并产生了当下我们所能观察到的宇宙中的所有结构，那么令人感到兴奋的是，这意味着一切又回到了费曼最开始的计算。在暴胀过程中，量子力学过程最终会导致物质密度涨落，这种涨落会坍缩，形成我们今天所见的星系和星

系团；如果引力子是像光子这样的基本粒子，那么我们就能够计算出，相同的量子力学过程也会在早期宇宙中产生引力子背景，这个背景也就是今天观测到的引力波背景。这的确是暴胀模型的核心预测之一，也是我个人一直在探索的一个物理学领域。最令人兴奋的是，我们可能很快就能够通过已经发射的卫星（用于探测宇宙中的大尺度结构）来探测这样的背景了。一旦这种背景被观测到，就表明当费曼决定像处理其他场论一样研究引力时，他所执行的那些计算使预测具有了与实际观察进行比较的可能。这至少意味着，他认为的量子引力存在深奥而无法察觉的效应是正确的。

在结束关于费曼对引力的迷恋的这一章之前，我们不妨再次回到他在自己发表的首篇引力学论文的开头所表达的歉意。费曼被量子引力理论所吸引，因为这一领域远离主流。出于同样的原因，他意识到情况确实如此，因为引力是如此之弱，一个人可能进行的唯一计算所带来的预测结果，可能也是永远无法测量的。所以，当他开始正式讨论量子引力效应时，他采取了退一步的说法："因此，很显然，我们正在研究的问题并不是正确的问题；正确的问题是，引力的大小是由什么决定的？"

没有比这更有先见之明的说法了。为什么引力比电磁力弱40个数量级，这个问题是推动理论粒子物理学家前进的真正谜团。包括弦论在内，当前几乎所有致力于统一（四种）基本作用力的努力，都是为了解决这个令人困惑的、关于宇宙的基本问题。在科学家们能够回答这个问题之前，他们很可能无法形成有关引力或其他力的全面而完整的理解。

这或许就是费曼带来的深远影响的最显著特征。他或许没能找到自然界许多基本奥秘的答案，但他却准确无误地揭示了至今仍占据着科学前沿的问题。

---

1. 新时代运动崇尚神秘主义，提倡精神活动及另类医学、占星术等非科学活动。——编者注
2. 2016年2月，激光干涉引力波天文台（LIGO，即文中提到的大型地面实验之一）宣布首次探测到两个黑洞并合发出的引力波。——编者注

第16章

留给后世的启迪

我玩的游戏非常有趣。它是一种穿着紧身衣[注]的想象。

——理查德·费曼

1959年12月，美国物理学会在加州理工学院召开了年度会议，费曼在这次会议上做了一次演讲。当时，他的脑海里再一次清晰地浮现出一种朝着新的、鲜有人涉足的方向发展的愿望。这次演讲是以我在前文中曾经引用过的一番话开场的："我猜实验物理学家一定常以欣羡的眼光看待像卡默林·昂内斯这样的人，因为他发现了像低温这样的研究领域，而这一领域似乎深不见底，人们可以在其中不断探索下去。这样的人则成了领域带头人，在这一领域的科学探险中具有暂时的垄断地位。"这次演讲的内容于次年发表在加州理工学院的《工程与科学》（*Engineering and Science*）杂志上，题目为《在底部还有很大空间》。这是一场美丽而富有想象力的讨论，指向的是一个充满各种可能性的新世界，无关粒子物理或者引力，其基础是可直接应用的物理现象。

尽管费曼此前选择专注于深奥的粒子物理学领域，但他也始终被我们可视、可感的世界中的物理学现象所吸引，并且沉醉其中。所以，对费曼来说，这次演讲象征着一个机会，使他能够任由想象力在一个自己一直着迷的领域里驰骋，为他的下一次科学探险寻找素材——某个他可能独领风骚的领域。同时，这次演讲也表明了他对物理学的两个领域的非凡可能性的痴迷。从孩提时代起，直到他在洛斯阿

拉莫斯工作的那段时间，这两个领域一直激发着他的想象力：机械设备和计算机。

这次演讲是一座里程碑，其内容经常被重印，因为它基本上勾勒出了一个全新的科学和技术领域，更确切地说，是与现在所谓的“纳米技术”相关，却又不局限于此的一系列领域。费曼的中心观点是，在1959年，大多数人在微型化方面的思考还不够大胆，因为在人类现有机器的尺寸和原子的尺寸之间，还存在着一片如宇宙般广袤的空间。他认为，我们不仅可以通过对这一空间的开发来改变技术，还可以开辟出当时科学家尚未触及的全新的科学研究领域。这些领域不同于量子引力，如果人们认真思考近在眼前的非凡宇宙，这些领域在他那个时代就可能被利用。正如他所说：“（这些领域）下面有一个极其微小的世界。到2000年，当人们回顾我们这个时代的时候，他们可能会问，为什么直到1960年才有人开始认真地朝这个方向发展。”

费曼在演讲开始即提到，有些人对一种能在大头针针头上写主祷文的机器印象深刻，但这不算什么。他首先设想了将整套《不列颠百科全书》写在大头针针头上的情形。但是，费曼提出，这也不算什么，因为利用常规印刷很容易做到这一点，只需将凸版印刷中使用的每个网点的面积缩小为原来的25 000分之一即可。根据他的观点，即使在缩小后，每个点仍可以容纳大约1 000个原子。他认为这并不是问题。

但是他认为这样还远远没达到极限——如果将世界上所有书籍中的所有信息都写在大头针的针头上，会怎么样呢？他对此做了一番估算，有趣的是，他所做的估算和我在《〈星际迷航〉里的物理学》（*The Physics of Star Trek*）一书中所做的估算颇为相似，当时我试图考虑为了以数字的方式传送一个人，需要存储多少信息。费曼认为，用边长为5个原子的立方体（总共有100多个原子）来存储1个比特的信息（1或0）已经绰绰有余了。他也估算出，全世界所有书籍（据他估计，当时全世界的书籍总量大约为2 400万册）共包含大约10^{15}比特的

信息。如果是这样的话，将全世界所有书籍中的所有信息都存储起来，只需要一个边长小于1/100英寸的立方体，其大小就像人眼所能看到的最小的尘埃！这么一说，你应该就对那个“极其微小”的世界有所了解了。

费曼想要探索在原子级别上利用材料的可能性，他所述材料的结构尺寸的范围几乎是深不可测的。此外，费曼一直对自己的初心念念不忘（如他在诺贝尔获奖讲座上所描述的那样），最令他感到激动的是，一旦科学家们开始在这一层面上进行工程领域的研究，他们将不得不直面量子力学的现实。他们将开始思考量子机器，而不是传统机器。这是一条将量子宇宙与人类的经验宇宙融合在一起的途径，还有什么比这更令人兴奋的吗?

重读他的演讲，我震惊于他非凡的先见之明。那次演讲之后，他所描述过的许多可能性都变成了现实，尽管有时并不完全如他所想，但那通常只是因为当时他的“紧身衣”里缺乏可供他进行合适想象的必要数据。需要重申的一点是，尽管他可能没有直接、亲自揭开所有问题的答案，但他提出了正确的问题，并指出了半个世纪以后最前沿技术的发展方向，也设想出了接下来50年中可能构成技术基础的原理。这里有一些例子：

将地球上所有的书籍写在一粒尘埃上。我们距离将所有的书籍写在一粒尘埃上还有多远？1988年，我在耶鲁大学执教时，我购买了当时整个物理系中最大的硬盘，容量为1 GB（吉字节），售价15 000美元。而现在，我的钥匙链上挂着一个曲别针大小的记忆棒，容量为16GB，售价49美元。我有一块用于笔记本电脑的2 TB（即2 000 GB）便携式外置硬盘，售价150美元，所以现在我仅需用1%的价格就可以买到2 000倍的存储空间。费曼估算的存储全世界所有书籍所需的10^{15}比特大约相当于100 TB，大约是50块便携式硬盘的容量。当然，这些驱动器中的大部分空间不是用来存储的，而是与读取机制、计算机接口以及供电有关。而且，除了使外置于笔记本电脑的存储设备在

体积上让人感到舒适之外，还没有人在存储空间的微型化方面进行过任何尝试。我们尚不能在原子级别的尺寸上存储大量信息，但是我们现在距此只有1 000倍的距离了。

1965年，英特尔公司的联合创始人戈登·摩尔提出了一个“定律”，即计算机的速度和可用的存储空间每12个月就会翻一番。在过去的40年中，由于技术水平与需求的持续同步，这一目标已经实现甚至超过了预期。因此，根据$1\,000 \approx 2^{10}$，也许我们距离费曼的目标只有10年的时间，到那时我们不仅能在针尖上书写全世界的书籍，也可以读取这些书籍的信息。

原子尺度上的生物学。费曼在1959年说了这样一番话：

> 当今生物学最核心和最基本的问题是什么？是下列这些问题：DNA（脱氧核糖核酸）中的碱基序列究竟是什么？基因突变时，具体会发生什么？DNA中的碱基序列是如何与蛋白质中的氨基酸序列联系起来的？RNA（核糖核酸）的结构是什么？是单链还是双链？它与DNA的碱基序列之间有什么关系？微粒体是如何构成的？蛋白质是怎样合成的？RNA去了哪里，是如何处于这个位置的？蛋白质处于什么位置？氨基酸进入了什么地方？在光合作用中，叶绿素位于何处，如何排列？类胡萝卜素的作用又是什么？将光转化为化学能的机制是什么？生物学的这些基本问题大多很容易回答，看一下你就知道了！

他在这里对现代生物学的前沿问题的列举，简直再清楚不过了。关于在原子水平上读取DNA分子中的碱基对序列的研究，已经获得了至少三项诺贝尔奖。人类基因组的测序一直是生物学领域的圣杯，测定基因序列的能力正在提高，其速度已经远超计算机领域的摩尔定律。人类基因组测序的首次完成耗资10亿美元以上，而现在，仅仅过了不到10年的时间，我们只需要花费几千美元就可以实现这一目标。

预计在未来10年内，人们只需要投入比在餐厅享用一顿美餐还要低的成本，就能够对自己的基因组进行测序。

了解分子的组成很重要，但是对生物学的发展而言，真正关键的是在原子尺度上确定三维的分子结构。蛋白质的结构决定其功能，而确定蛋白质的原子组分是如何折叠起来形成工作机制的，则是当下分子生物学领域最热门的课题之一。

然而，费曼也预测到，在原子水平上探测生物学体系的能力并不仅仅是一项被动的工作。在某种程度上，如果科学家们能够读取数据，他们也能编写数据——他们可以从零开始构建生物分子。而且，如果他们可以构建出生物分子，那么最终他们就可以从零开始构建出整个生物系统，也就是生命！更进一步，如果我们能够从零开始构建这些系统，并理解是什么让它们以目前的方式运转，我们就能设计出目前地球上并不存在的生命形式，或许是从大气中吸收二氧化碳并制成塑料的生命形式，或者能产生汽油的藻类。这听上去或许有些不切实际，但其实并非如此。哈佛大学的生物学家乔治·丘奇（George Church）以及克雷格·文特尔（Craig Venter，他的私人公司协助完成了人类基因组的首次解码）等生物学家正努力应对这些挑战，而且文特尔的公司最近得到了埃克森美孚公司的6亿美元资助，用于开发能生产汽油的藻类的项目。

观察与操控单原子。1959年，费曼对电子显微镜这一相对新兴领域的糟糕状况抱怨不已。由于电子很重（相对于无质量的光而言），电子的量子力学波长非常小。这意味着虽然光学显微镜受到可见光波长（约为原子直径的100到1 000倍）的限制，但是电子可以受磁场的操控，从物体上散射出去，从而形成更小的物体的放大的图像。然而在1959年，单个原子成像的可能性似乎十分渺茫，因为进入这个尺度需要很高的能量，这表明，为了观测单个原子，整个系统都会受到影响。

然而，今非昔比，现实再一次如费曼所料。现在，利用量子力学系统的特性，被称为扫描隧道显微镜（scanning tunnelling microscope，简称STM）和原子力显微镜（atomic force microscope，简称AFM）的两种新型显微镜，能够得到分子中单个原子的图像。此外，费曼还预测："据我所知，物理学定律并不反对以原子为单位操控物质的可能性。这并不是企图违反任何定律；原则上讲，这是可以做到的，但在实践中还不能实现，因为我们太大了。"果然被费曼说中，如今"原子镊子"已经被开发出来，采用了与新型显微镜相似的技术；此外，研究人员还发明了可以有规律地操纵和移动单个原子的强激光。同样，有三项诺贝尔奖被授予这方面的研究。

科学家们现在不仅可以分辨出空间中的单个原子，并且可以即时做到这一点。激光技术能够制造出飞秒（1飞秒=10^{-15}秒）级别的激光脉冲，这与单个分子间发生化学反应的时间尺度相当。通过用如此短的脉冲照射分子，研究者们希望能在原子级别上观察到这些反应过程中的事件发生顺序。

量子工程学。最让费曼感到兴奋的是他意识到一旦人们开始从事原子尺度的机器与技术方面的工作，量子力学的奇特性质就会显现出来。理解到这一点，人们可能就会希望设计出具有特定的，甚至是奇特量子力学性质的材料。费曼在演讲中是这样表述的：

> 如果我们真的能够按着自己的设想来排列原子，那么材料的性质将会是怎样的呢？对这样的问题开展理论研究是非常有趣的。我无法确知将会发生什么，但是我几乎可以肯定，当我们可以在小尺度上对事物的排列进行某些控制时，物质可能具有的性质将会大范围增加，我们也可以做更多不同的事。当我们达到那个极其微小的世界——比如7个原子构成的电路——时，我们会发现许多新鲜的事情，它们代表着材料设计方面的全新机遇。小尺度上的原子行为遵循量子力学的规律，因而和大尺度上的原子行为完全不同。所以，当我们在这样的尺度上进行探索并摆弄那里的原子时，我们要

> 遵循不同的法则，也能做不一样的事情。我们能够以全新的方式进行制造。我们不仅可以使用电路，也可以使用一些系统，这些系统涉及量子化能级，或者量子化自旋的相互作用等。

目前，美国物理学会有超过25 000名会员。在这些职业物理学家和学生当中，半数以上的人正在从事凝聚态物理学领域的研究，他们主要致力于在量子力学定律的基础上理解材料的电子和力学性质，以及开发具有特殊属性的材料，恰如费曼所预想的那样。从高温超导体到碳纳米管，再到量子化的电阻效应和导电聚合物等更为奇特的现象，这一领域的发展已使大量的新发明成为可能；至少10项诺贝尔物理学奖的颁发，与围绕这些人造材料的奇异量子特性而展开的实验或相关理论研究有关。晶体管功能的实现依靠的就是量子力学定律，它是我们今天使用的所有电子设备的基础。而正如晶体管改变了世界一样，在21世纪，甚至遥远的未来，世界科技的发展无疑要仰仗目前世界各地的研究实验室中正在进行的量子工程。

费曼觉得单凭他所描述的种种可能性或许不足以激励人们的积极性，于是在1960年，他决定亲自出资，设立两项1 000美元的“费曼奖”。第一项用来奖励“第一个能将书本上的信息缩小到原面积的1/25 000以内，并将其排列成能用电子显微镜读取的状态的人”。第二项用来奖励“第一个制造出能放进边长仅有1/64英寸的立方体（不计引线）的可运行的电动机（一种可以从外部进行控制的旋转电动机）的人”。（费曼是他那个时代的产物，尽管他的妹妹是个物理学家，但对他来说，物理学家和工程师都是男人。注）

费曼虽然很有远见，却在某种程度上低估了自己所处的时代。令他大为惊讶的是（同时也令他失望，因为真的不涉及什么新技术），距离他的那次演讲还不到一年，一位名叫威廉·麦克莱伦（William McLellan）的绅士出现在他家的门口，手里拿着一个木制的盒子，以及用来观察他的小电动机的显微镜，来领取第二个奖项。费曼虽然没

有正式设立这个奖项，但还是兑现了1 000美元的奖金。然而，在写给麦克莱伦的一封信中，费曼补充道：“我不准备兑现另一份奖金。因为在那次演讲之后，我结了婚，还买了房子！”他其实不必担心。足足过了25年，一位斯坦福大学的（男）研究生才按照费曼的要求完成了第一个题目，并领走了奖金。而彼时，1 000美元已经不是很大一笔钱了。

费曼虽然设立了这两个奖项，并且对实用型机器兴趣盎然（费曼在其职业生涯中一直为像休斯飞机这样的公司提供定期咨询服务，甚至在他将主要研究精力都投入到奇怪的粒子和引力等问题上时也是如此），但在1959年的那次演讲中，费曼最想要探究的是能否制造一种更快、更小且类型完全不同的计算机。这是他开始对这类问题进行思考的基本出发点，也是他在后来的职业生涯中唯一真正跟进的问题。

费曼很早就对计算机和计算领域甚为着迷（麻省理工学院计算机科学家马文·明斯基曾用难以置信的口气说，费曼曾对他说自己对计算一向比对物理更感兴趣），或许在洛斯阿拉莫斯工作的几年里，这种兴趣就初次到达了顶峰。在那里，这些计算活动对原子弹计划的成功至关重要。他开发了一种全新的算法，可以快速地对使用其他算法难以处理的复杂量进行心算估计，也可以求解复杂的微分方程。尽管当时他研究生刚毕业，但是汉斯·贝特认识到了他的能力，并让他担任了计算组的组长。计算组首先用铅笔和纸进行计算，然后用“马钱特计算器”这种笨重的手动机器进行计算，最后使用新的电子计算机（你可能还记得，在IBM专家赶来之前，费曼和他的团队已将这种新机器从盒子里取出并组装起来了）。这个小组什么都能算，从中子在炸弹中的扩散（这是确定临界质量需要多少材料所必需的），到模拟对成功制造钚炸弹至关重要的内爆过程。费曼在各个方面都十分出众，曾与他进行心算比试的贝特表示，他宁愿失去任何两位其他的物理学家，也不愿失去费曼。

早在电子计算机问世之前，费曼就与其他人协力打造了第一台“并行处理人体计算机”，预示着大规模并行处理器的到来。在费曼的领导下，松散的小组已经变成了一个紧密协作的团队，有一天，贝特走进来让这个小组对一些物理量做数值积分，于是费曼大声宣布：“好的，铅笔准备好，开始计算！”只见所有人都把手举到半空中，快速地转动了一下铅笔（这是费曼教给他们的小把戏）。这不仅是一种游戏：在电子计算机出现之前，为了提高运算速度，人们不得不将复杂的运算拆解成若干部分；否则，每一项计算，对于任何一个人或者任何一台马钱特计算器来说都太复杂了。但是费曼组织了一个很大的团队，主要由在洛斯阿拉莫斯的科学家们的妻子组成，每一个人负责处理复杂计算中的一个相对简单的部分，然后把这部分的计算结果传递给执行下一步计算的人。

这样的经历使费曼非常熟悉计算机的详细工作原理，包括如何将问题分解到计算机能够处理的程度（即费曼所说的，将电脑变成一个高效的“文档管理员”），更有趣的是，确定哪些问题可以在合理的时间内解决，而哪些不能。当他开始思考他的微型化进程时，所有这些又都回到了他的脑海中。计算机可以小到什么程度？如果更小、更复杂且具有更多计算单元的计算机能够被制造出来，那么我们在能源消耗和计算能力方面将面临哪些挑战，又将获得哪些收益？他在1959年的演讲中谈到了这些问题，并且将他的大脑与当时的计算机进行了比较：

> 我大脑里的计算单元的数量远多于我们“奇妙”的计算机中计算单元的数量。但是我们的机械计算机太大了，而我们脑子里的计算单元是极其微小的。我希望计算机的计算单元缩小到亚微观尺度……如果我们想要制造一台具有所有这些令人惊叹的额外性能的电脑，我们也许只能把它造得像五角大楼那么大。这样就会有几个缺点。首先，这需要的材料太多了；世界上所有的锗加起来可能都不够制造这个庞然大物所需的所有晶体管。此外，还有发热和功耗

的问题……但是，一个更加现实的困难是，这台计算机的运算速度会受到限制。由于它的体积很大，信息在其内部传输需要一定的时间，而信息传播的速度不能比光速快。因此，当计算机的速度最终变得越来越快，结构变得越来越复杂时，我们就必须把它们制造得越来越小。

费曼在1959年的演讲中所概述的这些智力上的挑战和机遇，成就了今天许多领域的发展。但唯有最后这个问题，他从一些出人意料的角度出发，结合他在演讲中提到的许多不同的可能性，进行了详细而认真的探讨。不过，他是20多年之后才回到这一问题上来的，对儿子卡尔的关心是使他回归的原因之一。20世纪70年代晚期，卡尔已经上了大学，就读于费曼的母校麻省理工学院。而且，让费曼感到高兴的是，卡尔将自己的研究领域从哲学转向了计算机科学。费曼对于思考儿子所在的领域很感兴趣。他将卡尔介绍给了他在加州认识的麻省理工学院教授马文·明斯基，明斯基将卡尔介绍给了住在他家地下室的研究生丹尼尔·希利斯（Daniel Hillis）。希利斯有一个疯狂的想法：创立一家公司，并制造一台强大的计算机，这台计算机用百万个独立的处理器并行计算，其间通过复杂的路由系统互相通信。卡尔将自己的父亲介绍给了希利斯——实际上，卡尔建议希利斯在去加州的时候拜访费曼。但是出乎希利斯意料的是，费曼开了两个小时的车去机场见他，以便了解这个计划的更多内容。费曼对这个计划的第一印象是"怪异"，这意味着他会思考这项计划的可能性和实用性。毕竟，这台机器将是他在洛斯阿拉莫斯发明的人体并行计算机的现代电子版本，再加上儿子的参与更使这个机会变得不可抗拒。

1983年，希利斯正式创立了"思维机器"（Thinking Machines）公司。当年夏天，费曼主动提出（与卡尔一起）到波士顿去工作，但是他拒绝根据他的科学专业知识给出一些模糊笼统的"建议"。他称这样的建议为"一派胡言"，并要求做一些"真正有意义的事情"。最终，在每个路由器需要与多少个计算机芯片相连接才能使并行计算成功这一

问题上，费曼给出了答案。令人吃惊的是，他在推导出这一答案的过程中并没有使用任何计算机科学的传统技术，而是采用了包括热力学和统计力学在内的物理学思想。更重要的是，虽然他的预测与公司其他计算机工程师的结果并不一致，但事实证明他是正确的。（与此同时，他展示了如何充分利用他们的计算机去解决其他计算机难以求得数值解的物理问题，包括模拟基本粒子物理系统的组态等问题。）

也大约是在这时，即1981年，他开始深入思考计算本身的理论基础，并且与加州理工学院的同事约翰·霍普菲尔德（John Hopfield）和卡弗·米德（Carver Mead）合作讲授了一门课程，内容包括从模式识别到可计算性本身的一系列问题。其中，模式识别是他个人一直非常感兴趣的问题，他也为此提出了一些古怪的、在当时根本不切实际的计算机方面的建议。在今天，模式识别仍然超出大多数计算机的能力范畴，这也是为什么当你登录某些网站时，为了将人类用户与自动化的电脑病毒和黑客区分开来，这些网站上会出现带有歪斜字母的图片，并要求你在进行下一步之前键入你所看到的内容。

计算物理学领域以及相关的物理学计算问题，最终引起了费曼的关注。他撰写了一系列的科学论文，还有一本他自1983年起讲授的相关主题课程的讲义集在他去世后出版（在有关他遗产的法律纠纷平息之后）。

有一段时间，他对元胞自动机（cellular automata）的概念很是着迷，并就这一问题与加州理工学院的天才学生斯蒂芬·沃尔弗拉姆（Stephen Wolfram）进行了详细的讨论。沃尔弗拉姆后来成为著名计算机数学软件“Mathematica”的创始人，这个软件在很多方面彻底改变了当今人们进行数值和分析计算的方式。元胞自动机本质上是数组中的一组离散对象，通过编程，可以使每个元胞在计算机进程的每一个时间步中，根据其最相邻元胞的状态来遵守相同的简单规则。在这种系统中，即使是非常简单的规则也会产生极为复杂的模式。毫无疑问，费曼对于现实世界是否会以这样的方式运转非常感兴趣，即每个

时空结点都以非常基本和局域性的规则作为基础，最终产生了在更大范围内观察到的复杂性。

不过，他的主要注意力很自然地转向了计算和量子力学方面的问题。他问自己，为了模拟量子力学系统而非经典系统，人们需要对计算机的算法做出哪些改变？毕竟，这两个系统的基本物理学规则是不同的。量子力学系统需要进行概率性的处理，而且正如他在重新表述量子世界时所指出的那样，为了恰当地理解量子世界的时间演化，我们需要同时计算许多不同可选路径的概率振幅（而不是概率！），这自然又需要借助能够并行处理不同计算，并在计算结束时将结果进行合并的计算机。

他在1981至1985年间撰写的一系列论文中，对这个问题进行了深入而精妙的思考，这些思考将他引入了一个新的研究方向，即再次回到自己1959年提出的想法：若不用传统的计算机模拟量子力学工作，我们能否设计出一种计算机，其计算单元小到可以受量子力学支配？如果可以，这将如何改变计算机的计算方式？

费曼对这个问题的兴趣显然来自他对于理解量子力学的持续热情。人们可能觉得，如果有谁了解量子力学是如何起作用的，那也只能是他。但是在他1981年首次讨论了量子计算机这个问题的讲座和论文中，他承认自己选择对这一问题进行思考的理由之一是，他对量子力学感到些微不适：

> 我可以马上说清楚，这样你们就知道我真正的意图是什么，一直以来（这是秘密！秘密！关上门！）——一直以来，我们在理解量子力学所代表的世界观方面存在很多困难。至少我是这样的，虽然我年纪已经不小了，但我仍然不能说我已经把它看得很清楚了。好吧，我仍然对量子力学感到紧张。所以，一些更年轻的学生……你们知道事情往往如此，任何新的想法，都需要一到两代人的时间才能看出它没有什么真正的问题。对我来说，量子力学远没到明显毫无问题的地步……我猜量子力学没有什么真正的问题，但是我不

确定这一点。这就是为什么我喜欢做研究。通过提出这个有关计算机的问题——这个或许与量子力学世界观有关，又或许无关的谜题——我能从中学到什么东西吗?

为了研究这一问题，费曼考虑了是否有可能用经典的计算系统以计算经典概率的方式来精确模拟量子力学行为。答案是否定的。如果存在这种可能性，那就等于是说真实的量子力学世界在数学上等价于经典世界，只是其中一个某些物理量未被测量到。在这样的世界中，人们只能确定可测量变量的概率结果，因为人们无法知道那些“隐变量”的值。如果这样的话，任何可观测事件的概率都将取决于一个未知的、未观测到的物理量的值。尽管这个想象世界听起来非常像量子力学的世界（阿尔伯特·爱因斯坦就希望我们生活在这样的世界里，即一个可感知的经典世界，其中量子力学怪异的概率本质只是因为我们不知道自然界中的某些基本物理参数），但恰如约翰·贝尔（John Bell）在1964年的一篇精彩论文中描述的那样，真实的量子力学世界远比这更加怪异。不管我们是否愿意，量子世界与经典世界永远不可能是等价的。

对于贝尔的研究，费曼给出了一个精彩的物理学例子，他证明了如果人们试图模拟一台传统计算机，使它能够产生与量子系统在演化过程中产生的某些可观测量完全相同的概率，那么其他一些可观测物理量的概率必须为负值。这种负概率没有任何物理意义。这一例子以具体可感的方式表明，量子概率的世界大到纯粹的经典世界无法容纳的程度。

费曼不仅提供了一个精彩的物理学证明，解释了为什么所有的“隐变量”理论都注定会失败，还在文章中提出了一个更加有趣的问题：是否可能发明一种本质上基于量子力学原理的计算机？换句话说，如果基本的计算机比特单元是量子物体（比如电子的自旋），那么我们是

否可以对任何量子力学系统的行为进行数值化的模拟，从而解决传统计算机无法有效处理的量子力学模拟问题?

在1982年的论文中，他最初给出的回答是一个响亮的“有可能”。但是，在IBM实验室的物理学家查尔斯·贝内特（Charles Bennett）工作的激励下，费曼对这个问题展开了进一步的思考。贝内特的研究表明，关于计算物理学的许多传统观点是不正确的。特别是有一种传统的假设认为，计算机每执行一次计算都必然会以热的形式耗散能量（毕竟，任何使用笔记本电脑工作的人都知道电脑会变得很热）。然而，贝内特发现，原则上来讲，计算机的“可逆”计算是可能实现的。换言之，理论上我们可以执行一个计算，然后精确地执行一个反向操作，最后回到计算开始的地方，而不会以热量的形式损失任何能量。

那么问题来了，量子力学世界的量子涨落是否会破坏这个结果呢？在1985年的一篇论文中，费曼表明答案是否定的。但是为了使这个结果成立，费曼必须建立一个通用量子计算机的理论模型，即一个纯量子力学系统，其演化可以被控制，以产生作为通用计算系统一部分的必要逻辑单元（包括“与”“非”“或”等）。他为这样的计算机开发了一个模型，并描述了原则上应如何操作它，从而得出结论：“无论如何，物理学定律似乎对计算机尺寸的减小没有任何阻碍，除非比特缩至原子大小，而量子行为占据主导地位。”

虽然费曼提出的一般物理问题的学术性很强，但他意识到，建造一种小到量子力学定律可以控制其单个计算单元行为的计算机，这种可能性或许具有实际意义。费曼指出，他在理论上描绘出的量子计算机是模仿传统计算机而设计的，每一个逻辑运算都是按顺序进行的；随后，他又看似漫不经心地补充道：“本研究尚未涉及在这些可逆量子系统中，如何通过并行操作来获得可用的速度。”这行文字中隐含的可能性能够轻易地改变我们的世界。尽管费曼本人后来并未在量子计算问题上取得开创性的成就，但他提出的主张将再一次在一代人的时间里主导整个领域的研究发展。

正是在费曼提出的传统计算机永远无法完全模拟量子系统这一观点的影响下，量子计算成了理论和实验研究中最令人兴奋的领域之一。量子系统比经典系统要丰富得多，因此“量子计算机”有可能执行新型的计算方法。凭借这些新型算法，量子计算机将能够高效而实际地完成当今最大的传统计算机耗费比宇宙年龄还长的时间才能完成的计算。

实际上，量子计算思想的核心在于费曼在洛斯阿拉莫斯时曾明确利用过的一个简单的特性，而他的量子力学路径积分公式也明确地展现了这一特性。就其本质而言，量子系统会同时探索无限多的不同路径。如果每条路径都能代表一个特定的计算过程，那么量子系统可能就是自然界完美的并行处理器！

考虑一下费曼最初讨论的系统，即一个简单的具有两个自旋态的量子力学粒子，我们将这两个自旋态标记为“上”和“下”。如果我们将自旋态“上”称为“1”，将自旋态“下”称为“0”，那么这个自旋系统描述的就是一个典型的单个计算比特信息。然而，这种量子力学系统的重要特征在于，根据量子力学定律，我们可能测量到它处于两种状态的任意一种，每种对应一个有限的概率值，这无异于说它真的会同时处于两种自旋态！这使得量子比特与经典比特之间有着很大的不同。如果我们能在不实际测量并迫使它进入一个特定自旋态的情况下操作一个量子比特，就有可能让一个量子处理器同时进行多个计算。

1994年，贝尔实验室的应用数学家彼得·肖尔（Peter Shor）论证了这样一个系统的潜在能力，并引起了全世界的关注。肖尔的研究表明，量子力学计算机能够有效地解决某个特定的数学问题，而先前研究表明，这一问题实际上是传统计算机无法在有限的时间内解决的。这个问题可以简单概括为：每个数都可以唯一写成若干个质数的乘积，比如，15=3×5，99=11×3×3，54=2×3×3×3，等等。随着数字越来越大，这种唯一性的因数分解难度呈指数级增长。肖尔证明，可以为

量子计算机开发一种算法，来探究任何一个数的质因数空间，并得到正确的因数分解结果。

我们为何要关注这个相当枯燥的结果呢？因为这件事对于我们这些在银行有存款，或者使用信用卡进行交易，或者关心用于保护国家机密的密码安全的人来说，都是很重要的。现代所有的银行业务和国家安全信息都是用一个简单的代码加密的，任何传统计算机都无法破解这一代码。加密的方式是使用“密钥”，而密钥就是一个非常大的数的质因数。除非我们事先知道这些因数，否则我们无法使用普通的计算机破解代码，因为将大数分解为质因数的过程花费的时间比宇宙年龄还要长。但是，一台足够“大”的量子计算机却可以在可行的时间范围内完成这项工作。“大”的含义取决于问题的复杂程度，但是含有几百或几千个量子比特的系统将很容易胜任这项工作。

假如我们的国家安全系统崩溃，我们是否应该冲出家门，把钱从银行取出并匿于床下，或者冲进生存避难所，等待即将来临的入侵？显然不必。首先，尽管人们在实验工作中投入了大量资源，但目前构建的量子计算机中所包含的量子比特数还很少[注]。其中的原因很简单：为了让计算机表现出量子力学行为，必须小心地将量子比特与所有外部相互作用隔离开来，否则这些外部相互作用将有效清除系统中存储的量子力学信息——这也是我们的日常行为表现出经典力学而非量子力学性质的原因。在大多数系统中，我们通常称之为“量子相干”（系统中各独立组成部分的量子力学组态得以保持的性质）的性质在极短的时间内就被破坏了。使量子计算机保持“量子”的状态是一项重大挑战，而且没有人知道这在操作意义上最终是否可行。

比这一现实考量更为重要的是，量子力学原理不仅可以使量子计算机避免传统计算机在解决诸如质因数分解这类问题时的限制，也使新型“量子传输”算法的开发在原则上成为可能，使信息得以在“点”与“点”之间进行绝对安全的传输。这意味着，我们能够准确无误地判断出我们的信息是否被某个第三方窥探并拦截。

1960年从费曼的眼睛里焕发出的那道光彩，已跃入现代科学技术的前沿。在这个过程中，大量想法喷涌而出，一时难以尽述。这些想法不但推动了量子计算这个新兴领域的进步，并且最终可能会改变现代工业化社会的组织方式。尽管费曼在其有生之年未能充分感受到自己建议的重要性，但从实际意义上讲，这些研究进展可能代表了费曼最重要的学术遗产之一。一个大胆而有创造力的头脑所做出的看似深奥的推测，如何助推了世界的改变，这一点总令我们惊诧不已。

---

1. “紧身衣”的意思是，想象必须受到物理现实的限制。参见2004年诺贝尔物理学奖得主弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek）发表于2016年6月2日的《华尔街日报》上的文章，题为《如何培养科学想象力》（How to Teach Scientific Imagination）。——译者注
2. 费曼的原话是将这两笔1 000美元的奖金分别奖给两位男人（“the first guy”）。在一般情况下，“guy”在英文中用来指男性。——译者注
3. 在2019年国际消费电子展（CES）上，美国IBM公司展示了全球首台独立量子计算机“IBM Q System One”的模型，该计算机包含20个量子比特。——译者注

第17章

真、美与自由

> 不了解事物，漫无目的地迷失在神秘的宇宙中——据我所知，这或许就是万事万物的存在方式，但这并不会令我感到害怕。
>
> ——理查德·费曼

1967年10月8日，《纽约时报杂志》（*New York Times Magazine*）登载了一篇题为《两个寻找夸克的人》（Two Man in Search of the Quark）的文章。作者李·埃德森（Lee Edson）说："科学家们对'夸克'的疯狂追逐，在很大程度上是由加州理工学院的两位物理学家默里·盖尔曼和理查德·费曼所主导的……一位加州科学家将这两人称为'当今理论物理学界最受瞩目的人物'。"

从当时的情况来看，后一种说法是恰如其分的，而前一句则不然。在此前的六七年里，在与盖尔曼合作完成了弱相互作用方面的研究之后，费曼已逐渐离开了厘清粒子物理学中出现的混乱局面的研究潮流，因为由加速器中出现的强相互作用粒子所组成的"粒子动物园"日渐拥挤，这似乎是为了嘲讽所有被这一情形所吸引的人，他们就像《奥德赛》中的那些水手一样，被海妖的歌声蛊惑，却最终使航船触礁沉没。而与此同时，盖尔曼则利用他和同事们所能掌握的一切手段，对这一情形进行了正面应对，在一系列的努力和失败的尝试之后，终于为这一僵局的破解带来了一些希望。

在参加康奈尔大学为汉斯·贝特60岁生日而举办的庆祝活动时，费曼在他的发言中总结了这一情形，呼应了他在20世纪50年代初发表的第一篇关于液氦的论文中的最初观点："我之所以没有对强相互作用的

粒子做太多研究，其中一个原因是我认为尚缺乏足够的信息来整理出一个好的想法。我的好同事——盖尔曼教授，一直在证明我是错的……我们突然听到了果壳破裂的噼啪声。”

要理解20世纪60年代前5年间主导粒子物理学研究的这一混乱局面，我们只需要反思一下当前理解量子引力和相应的可能成立的“万有理论”的最佳方法。指引物理学家从事研究的想法很多，但相关数据却很少，而且我们越是沿着理论建议的方向进行探索，遇到的情形似乎就越复杂。诚然，在20世纪60年代，实验机器给出了更为充足的数据，但是没人知道这些数据将把研究引向何方。如果有人在1965年提出，在未来10年内，我们将会发展出一套几乎完整的理论基础，不仅可以用来理解弱力，也能理解强力，当时的大多数物理学家都不会轻信。

盖尔曼确实凭借着自己非凡的洞察力敲开了果壳。当时，许多物理学家已经开始考虑放弃以适用于QED的技术来理解粒子物理的可能性，盖尔曼则于1961年发现了群论的重要性，群论为他提供了一种数学工具，使他可以通过粒子的对称性来为新发现的海量基本粒子分类。令人惊奇的是，所有不同的粒子似乎都属于各种多重态，顾名思义，这种状态下的每一个粒子都能够通过应用与“群”有关的对称性变换而转变成另一个粒子。这些对称性与我先前描述的旋转相似，可以让某些图形（如三角形和圆形）在经过某种操作后看起来与原先一样。在盖尔曼的方案中（来自世界其他地区的另外几位科学家也分别独立提出了这一方案），不同的粒子可以归入不同的“表示”中，每组粒子的性质（比如电荷和奇异数）都可以表示成多面体的各个顶点，而每个多面体中的所有粒子都可以通过对称性相互转换，从而形成使多面体向不同方向旋转的效果。

盖尔曼发现的可以归类强相互作用粒子的群被标记为$SU(3)$，它有8种基本的内部旋转，可以与不同大小、不同形状的多面体样多重态中的粒子建立联系，而最明显的“表示”包含8个元素。通过这种方式，他

能够对几乎所有已知的强相互作用粒子进行分类。这一分类方案的成功令盖尔曼大喜过望（但当时盖尔曼所掌握的证据还远不足以令他和其他同行确认这种方法的正确性），他将这一方案称为“八正法”（eightfold way），这不仅仅是由于*SU*(3)的数字特征，也带有典型的盖尔曼风格，因为这一名称源于佛陀给出的达到涅槃的8种方法：“僧侣们啊，这是引导我们停止痛苦的神圣真理；这是高尚的八正道；正见、正思维、正语、正业、正命、正勤、正念、正定。”

盖尔曼以及以色列物理学家尤瓦尔·内曼（Yuval Ne’eman）以这种方式对粒子进行分类时，发现有9个成一组的粒子无法这样分类。然而，已知的*SU*(3)对称群中含有一个10元素的“表示”，即所谓的去耦合态。他们分别独立提出，把那9个粒子归入这一“表示”可能是个合适的选择，但这就表明，还存在另外一种尚未发现的粒子。盖尔曼很快宣称这样一种新粒子必然存在，他将其命名为Ω–，他运用对称性理论概述了这个粒子的预期性质，以便实验物理学家寻找它。

不用说，寻找的过程跌宕起伏，充满戏剧性。正当实验人员准备放弃时，他们发现了盖尔曼所说的粒子，其性质与他的预测完全吻合，包括它的奇异数，而且质量的误差只有1%！八正法不仅幸存了下来，而且得到了进一步的发展！

在实验人员发现Ω–的第二天，也就是1964年1月底，欧洲期刊《物理快报》（*Physics Letters*）杂志刊载了盖尔曼的一篇论文。他认定，他那古怪的推测，以及又一个新奇的术语，永远不会被美国《物理评论》尖锐的审稿人所接受。

盖尔曼以及其他人并没有忽视*SU*(3)中的3可能具有的某种物理意义。实际上，*SU*(3)对称群中的8元素多重态都可以通过3组更小的基本表示的适当组合来构成。那么，这3个元素在某种程度上是否对应着3种基本粒子呢?

问题在于，如果像质子这样的强相互作用的粒子是由三种次级结构单元组成的，那么相比较而言，这些次级结构单元通常将带有分数

电荷。然而，物理学的特征之一是所有观察到的粒子，其电荷都是质子和电子所带电荷（电荷数相等，符号相反）的整数倍。没有人知道为什么会这样，从某种程度上来说，现在我们仍未找到其中的原因。但这似乎是自然界的一种必然的存在。

然而，在经过了一年左右的讨论与忐忑之后，盖尔曼在詹姆斯·乔伊斯（James Joyce）的《芬尼根的守灵夜》（*Finnegans Wake*）中发现了一句精彩的台词："Three quarks for Muster Mark!"(注)在这句话的启发之下，盖尔曼撰写了一篇只有两页纸的简短论文，他提出，将"八正法"作为所有强相互作用粒子的基本分类方案在数学上是可行的，只要这个方案的基本组成成分是3个不同的带分数电荷的物体，即他称之为"夸克"（quark）的物体。

对于提出一整套新的、古怪的且可能荒谬的粒子的存在，盖尔曼自己也持谨慎的态度。当时，物理学界那些持传统思维的人倾向于认为有关基本粒子的构想本身就是错误的，所有的基本粒子都可以由其他粒子组合而成，这就是所谓的"核民主"（nuclear democracy）。因此，盖尔曼小心翼翼地辩称，这些被他称为"上"、"下"和"奇"的夸克物体，也许只是使计算工作得以有效进行的数学上的假设。

值得注意的是，几乎在同一时间，欧洲核子研究组织（CERN）欧洲加速器实验室的博士后研究员乔治·茨威格（George Zweig，毕业于加州理工学院，曾是费曼的研究生）完成了一份完全类似的提案，而且包含更为详尽的细节。此外，茨威格显然更倾向于提出，这些他称之为"艾斯"(注)的新的带有分数电荷的物体可能是真实存在的。当看到盖尔曼发表的简短论文后，茨威格打算尽快将自己已完成的80余页的论文投到《物理评论》上去。但在这类事情上，盖尔曼显然更为明智，茨威格始终未能让自己的研究成果登上那本古板的杂志。

毫无疑问，鉴于盖尔曼从V–A到Ω–的一系列非凡成就，"艾斯"败给"夸克"是在所难免的。然而，物理学界对盖尔曼这一提议的反响并不热烈，而是像对待一场意外妊娠，兴奋之中夹杂着不安和抵触。归

根结底，带分数电荷的粒子在哪儿？从加速器数据到一切可能之处，所有搜寻都一无所获。因此，尽管《纽约时报杂志》在1967年的那篇文章中将夸克奉为了圣品，但随后又进一步引用了盖尔曼的说法，称夸克可能只是“一个有用的数学假设”。

同样也是在1967年，费曼最终决定回到他最初热爱的粒子物理学领域，寻找可供钻研的有趣问题。费曼在《纽约时报杂志》的那篇文章中表达了对盖尔曼的赞美，但此外，他并没有对盖尔曼在过去5年间推动了领域发展的工作表现出多少热情。他对Ω–的发现持高度怀疑的态度，而夸克在他看来相当无趣，甚至当他以前的学生茨威格提出“艾斯”时，费曼对这一想法也从未表现出丝毫热情。他觉得，理论物理学家们在群论的语言中寻求安慰的努力，更像是一种精神寄托，而非实际的理解。在他看来，这些物理学家就像是在用“简单儿语”般的数学语言来重复他们自己的工作。

或许有人会怀疑，费曼对这件事的反应中可能夹杂着一丝妒忌；不过，这种态度更有可能出自他天生的怀疑主义，以及他本质上对其他物理学家所思考的问题的冷漠。到当时为止，他一直坚持这样的看法，即强相互作用的数据过于混乱，无法进行有效的理论解释；而且他避开了20世纪60年代所有失败的流行理论，包括“核民主”的观点及其对基本粒子的反对。他的快乐来自解决问题，并且由他自己来解决。正如他在获得诺贝尔奖之后这样说：“我只需解释自然界的规律——我不必去解释朋友们提出的方法。”这句话也体现了他的治学原则：“忽视”。然而，因为他要主讲新一轮的粒子物理学课程，这迫使他必须要追踪学科发展的前沿。对费曼来说，这意味着要对实验数据进行细致入微的了解。

事实证明，此时正是做这件事的大好时机。一台新的粒子加速器已在加利福尼亚北部的斯坦福大学建成，距离加州理工学院不远。这台新的加速器采用了一种与以往不同的技术来探测强相互作用的粒子。以往的探测手段是将粒子撞击到一起，并观察发生了什么，而斯

坦福直线加速器中心（SLAC）的机器则将电子在两英里长的轨道上加速，并将它们撞入原子核内。由于电子不受强力的影响，科学家们能够更容易地解析它们的碰撞，而不必考虑强相互作用的不确定性。他们希望通过这种方式来探测原子核，就像欧内斯特·卢瑟福75年前所做的那样——卢瑟福通过用电子轰击原子的方式发现了原子核的存在。1968年夏天，费曼去看望他的妹妹，他决定顺路访问SLAC，亲自了解在那里发生的事情。

费曼已经考虑过怎样合理地解释有关强相互作用粒子的实验数据，我估计他受到了之前液氦工作的影响。在前文中我们曾经提到，费曼曾试图理解液体中由原子和电子组成的致密系统在低温下有怎样的表现，为什么在低温下原子之间的相互作用看起来好像完全消失了一样。

早期实验结果显示，强相互作用粒子间的复杂散射行为在某种程度上与液氦中的情形类似。虽然费曼对使用基本理论来解释这些数据感到迟疑，但或许也正因如此，费曼认识到他可以解释一些一般性特征，而不必求助于任何具体而详细的理论模型。实验结果带来的启示之一就是碰撞最经常发生于质子尺度的粒子之间，而不是更小的尺度上。他推断，如果质子有内在的结构单元，那么这些成分不能在更小的尺度上强烈地相互作用，否则会在数据中有所体现。因此，我们可以选择用一个简单的“玩具模型”来描绘强相互作用的粒子，即所谓的“强子”（hadron）：一个充满“结构单元”的盒子。费曼称这些结构单元为“部分子”（parton），它们在小尺度上不发生强相互作用，但是出于某种原因，它们被限制在强子内部。

这一想法即所谓的“唯象法”，也就是说，它仅仅是一种解读数据的方法，借由对数据的观察来探索能否从一团混乱之中提炼出规律性的东西，从而得到一些内在的物理学线索，就像费曼对液氦所做的描述那样。当然，费曼注意到了盖尔曼的夸克和茨威格的“艾斯”，但是他并不打算构建有关强子的宏大的基本理解，而只想弄清楚如何从实

验中提取有用的信息。因此，他并没有试图将他的“部分子”构想与盖尔曼和茨威格提出的粒子联系起来。

费曼认识到了他的构想的局限性，以及它与普通模型建构方式之间的区别。因此，他在关于这一主题的第一篇论文中指出：“这些观点源自多个方向的理论研究，并不是对任何一个模型进行考虑的结果；它们是对相对论、量子力学以及一些经验事实所揭示的一些特征的提取，这些特征几乎独立于任何模型。”

不管怎样，费曼的构想使他能够去考虑大多数试图用某种基本模型去解释数据的物理学家都回避的过程。这些物理学家聚焦于所有可能性中最简单的一种，即两个粒子进入“碰撞区”，然后有两个粒子离开了这个区域。然而，费曼认识到他可以利用自己的简洁方法探索更加复杂的过程。在这些过程中，如果实验者用足够的能量使强子正面撞击在一起，从而产生大量粒子，他们将有望测量出好几个出射粒子的详细能量和动量。有的人可能会认为，在这种情况下，他们不会获得多少有用的信息。然而在“部分子”模型的激发之下，费曼却提出，这些过程——他称之为“单举过程”（inclusive process）——实际上可能值得思考。

费曼认识到，在能量很高的状态下，相对论效应会令每一个粒子在以其他粒子为参照时，看上去就像一张薄饼，因为沿着运动方向的长度缩短了。此外，受时间膨胀的影响，薄饼周围各个部分子的横向运动似乎会减缓到停滞状态。因此，对于其他强子来说，每一个强子看上去都像是一张薄饼中静止的点状粒子的集合。然后，假设接下来的碰撞只涉及每个发生碰撞的薄饼中的一个部分子，其余部分子则简单地彼此经过，那么物理学家就能够弄清楚“单举过程”的含义：碰撞中只有一个出射粒子的信息被详细测量出来，而对于飞过去的其他粒子，我们只能记录下它们的一般分布特征。费曼提出，如果这一碰撞模型是正确的，那么某些可测量的量，比如在入射粒子束方向上测量的出射粒子的动量，应该具有一个简单的分布。

路易·巴斯德（Louis Pasteur）有一句名言：“机遇总是眷顾有准备的人。”1968年访问SLAC时，费曼也是“有备而来”。那里的实验人员一直在分析数据，其中一位名叫詹姆斯·比约肯（James Bjorken，在物理学界通常被称为“Bj”）的年轻理论物理学家指出，高能电子散射到质子靶上的第一组数据显示，电子在质子靶上的散射产生了大量的出射物。比约肯是一位意志坚决、温文尔雅、才华横溢的理论物理学家，他经常语出惊人，但其结论值得考虑。当时SLAC的氛围也是如此。

利用场理论的详细观点（其中许多观点源自盖尔曼），比约肯在1967年提出，如果实验人员只测量这些碰撞中出射电子的性质，他们会发现如果质子是由点状结构单元组成的，那么出射电子的分布规律就会与质子不由点状结构单元组成的情况大不相同。他称这些规律为“标度无关性”（scaling properties）。

尽管SLAC的相关实验学家并没有真正理解比约肯标度无关性假说的详细理论依据，但是比约肯的观点确实为实验学家提供了一种分析数据的有用方法，所以他们决定采纳。而且，数据确实与他的预测相符。然而，这种一致性并不代表比约肯那多少有些晦涩的提议是绝对正确的，其他机制也可能产生同样的效果。

费曼访问SLAC那天，比约肯恰巧不在，因而费曼直接与实验研究者进行了交流。可想而知，费曼当天未能清楚地了解比约肯为什么或如何得到了这些结果。但实验研究者使费曼对这些结果本身有了更好的理解。在考虑过“强子–强子”碰撞这种更加复杂的情况之后，费曼意识到，“电子–质子”碰撞可能更容易分析，而观察到的标度无关性或许可以根据他的部分子模型来给出简单的物理学解释。

当天晚上，在去了一家脱衣舞酒吧寻找动力后，费曼顿悟（这件事的真实性有待考证）。回到宾馆房间后，他证明了标度无关性确实有一个简单的解释：在质子对于入射电子来说就像薄饼一样的参照系中，如果电子被单个的部分子弹开（每个部分子实质上是独立的），

那么比约肯推导出来的标度无关性函数就可以被简单地理解为在质子内部找到带有给定动量的一个部分子的概率，其权重为部分子所带电荷的平方！

这是一个可以被实验人员理解的解释，当比约肯爬完山回到SLAC时，费曼仍在那里，他找到比约肯，就他已经了解的以及尚不清楚的情况提出了许多问题。令比约肯印象最深的是费曼使用的语言，费曼的表述方式与他自己对事物的思考非常不同。他后来说道：“那是一种简单明了且富有魅力的语言，每个人都能理解。部分子模型立刻流行开来。”

毫无疑问，费曼为自己的简单模型对新数据的解释能力而心满意足、欢欣鼓舞。他和比约肯还认识到，如果使用不与部分子发生电磁相互作用，而是发生弱相互作用的其他入射粒子，即中微子来探测质子，可以获得关于质子结构的补充信息。费曼再度成为某个研究领域的中心人物。几年之后，当他关于这一想法的第一篇论文发表时，这项研究，即所谓的“深度非弹性散射”（deep inelastic scattering）分析，已经成为当时所有物理研究的焦点所在。

当然，此时的核心问题变成：部分子真的存在吗？如果存在的话，部分子就是夸克吗？费曼认为第一个问题很难全面地回答，因为他的模型是极度简化的，真实的物理现象可能更加复杂。数年后，在一本相关主题的著作中，他明确表达了自己的担忧：“必须指出，即使我们的‘纸牌房子’得以存续，且被证明是正确的，我们也并未因此而证明部分子的存在……部分子是一种有用的心理导引，指出了我们可能得到的粒子间的相互关系；而且如果它们持续地以这种方式提供其他可靠的预测，它们当然会开始变得‘真实’，可能和我们用以描述自然的任何其他理论结构一样真实。”

至于“部分子”是否就是“夸克”，要回答这个问题越发困难。首先，在基本粒子的概念遭到普遍反对的理论环境下，人们在短时间内

不会对这一问题展开严肃讨论；其次，即使部分子确实代表夸克，为什么它们没有在高能碰撞中被释放出来，被我们看见呢?

然而，随着时间的推移，物理学家们运用费曼发展起来的形式体系，逐渐从数据中提取出了部分子的性质，他们发现，部分子所携带的分数电荷逐渐显露了出来。到20世纪70年代初，费曼开始确信，部分子具有盖尔曼所假设的夸克（以及茨威格的“艾斯”）的全部性质，然而他却仍然称其为“部分子”（可能是为了气盖尔曼）。而盖尔曼则反过来取笑费曼的简化模型，以此来转移人们对他不愿意相信夸克确实存在的批评。最终，由于夸克是一个来自基本模型的概念，物理学界在20世纪70年代以质子的夸克模型代替了部分子模型。

但是，夸克在哪里？为什么它们永远藏在质子里，而不会出现在其他地方？为什么在已知的自然界最强力，即支配质子间，甚至夸克间碰撞的强相互作用的控制下，夸克在质子内部却表现得如同自由粒子?

值得注意的是，不到5年，不仅这些关于强相互作用的问题得到了实质性解答，而且理论物理学家们对自然界中的弱相互作用也形成了基本认识！在这场混乱开始后，10年间，人们已经从本质上理解了4种已知自然力中的3种。在人类探索自然基本规律的道路上，最重要、可能也是被公开宣传得最少的理论革命已经基本完成。发现标度无关性以及夸克的SLAC实验物理学家获得了1990年诺贝尔奖，而发展了我们目前使用的弱相互作用及强相互作用“基本模型”的理论物理学家，则先后获得了1979、1997和2004年的诺贝尔奖。

我们也必须看到，在这段时期以及这之前的5年里，费曼的工作在很大程度上对这场革命具有直接的推动作用。在研究的过程中，费曼并未考虑过，或许也从未充分认识到，他的工作促进了人们对于科学真理本质的新理解。同时，这也意味着他自己在QED方面的工作并非权宜之计，而是提供了一种新的基本物理学理解，即为什么合理的自然理论在我们能够测量的尺度上会产生有限的结果。

巧的是，这一切的发生都要从1953—1954年盖尔曼和他的同事弗朗西斯·洛在伊利诺伊州所做的工作说起。当盖尔曼第一次访问加州理工学院时，他们的论文给费曼留下了深刻的印象。他们在文章中指出，电子电荷的有效量级会随着尺寸的变化而变化，当靠近并穿过屏蔽电荷的虚拟正负电子对云时，电荷的有效量级会变大。

坐标东移，在1954年夏天，长岛布鲁克海文实验室的杨振宁及其同事罗伯特·米尔斯（Robert Mills），在QED对自然本质的成功解释的鼓舞下发表了一篇文章，提出了一种可能的理论推广。他们认为，这种理论推广可能适用于对强核力的理解。

在QED中，电磁力的传播是经由无质量粒子——光子的交换来进行的。电磁相互作用的公式形式受到所谓的“规范对称性”的严格限制，这种对称性实质上保证了光子是没有质量的，因此，如前所述，光子间的相互作用是长程的。注意，在电磁相互作用中，光子与电荷耦合，而光子本身是电中性的。

杨振宁和米尔斯提出了一种更加复杂的规范不变性，其中许多不同种类的“光子”可以在许多不同种类的“电荷”间发生交换，并且一些光子本身可以带电，这意味着它们会与自身以及其他光子发生相互作用。“杨–米尔斯方程”中的新的对称性，既令人着迷又发人深思。例如，强力似乎无法区分质子和中子，因此在质子和中子之间创造出一种对称性，也创造出一种带电的类似光子的粒子（这种粒子能够以某种方式与质子和中子耦合并使质子和中子相互转化），具有一定的物理意义。此外，在QED中成功去除无穷大量的关键在于该理论的规范对称性，因此将其作为新理论的基础是合理的。

问题在于，新方程的规范对称性总体上要求新的光子是无质量的，但是由于强相互作用是短程的，只在原子核尺寸上起作用，所以实际上新的光子又必须具有较大的质量。他们不知道这种情形到底是怎样发生的，因此他们在文章中并未给出一个真正的模型，只是提供了一种想法。

尽管存在这些问题，但“杨–米尔斯理论”的狂热爱好者们，比如朱利安·施温格和默里·盖尔曼，在20世纪五六十年代对这一理论进行了持续的探索。因为在他们看来，该理论的数学结构可能是理解弱力或强力（或者这两者）的关键。有趣的是，杨–米尔斯理论的群对称性可以用后来被盖尔曼用来给强相互作用粒子分类的同一种群论语言来表达。

施温格为他的研究生谢尔顿·格拉肖布置了一项任务：思考一下什么样的群结构，以及什么样的“杨–米尔斯理论”，可以描述与弱相互作用相关的对称性。1961年，格拉肖不仅找到了一种候选对称性，更值得一提的是，他指出这种对称性可以与QED中的规范对称性相结合来生成一个模型。在这个模型中，弱相互作用和电磁相互作用都来自同一套规范对称性，并且除了QED中的光子之外，还有其他三种规范玻色子参与其中，即我们现在所知的新型光子。然而，格拉肖也遇到了问题：弱相互作用是短程的，而电磁相互作用是长程的，格拉肖没有解释如何协调这种差异。一旦新粒子被赋予了质量，模型中的规范对称性，以及由它带来的模型之美和潜在的数学一致性都将消失。

之所以会产生这样的问题，部分原因在于，没有人真正知道如何将杨–米尔斯理论转变成像QED那样的完全自洽的量子场理论。其中涉及的数学问题更加烦琐，完成这项任务所需的动机并不存在。现在，该轮到理查德·费曼出场了。当他第一次尝试用处理量子理论的方式研究引力时，他面对的数学问题难度很大，于是他向盖尔曼寻求建议。盖尔曼建议他首先解决一个更简单的问题。他向费曼介绍了杨–米尔斯理论，并指出这些理论中固有的对称性与广义相对论中的对称性非常相似，但又不那么令人生畏。

费曼采纳了盖尔曼的建议，对杨–米尔斯理论的量子属性进行了分析，并获得了许多开创性的发现。仅仅几年后，他就对这些发现进行了详细的描述。特别是，他发现为了使有关量子理论的费曼规则保持一致，人们需要为内圈添加一个虚构的粒子，才能计算出正确的概

率。这个问题后来被苏联物理学家路德维希·法捷耶夫（Ludvig Faddeev）和维克多·波波夫（Victor Popov）再次发现，现在这类粒子被称为“法捷耶夫–波波夫鬼粒子”。此外，费曼也发现了量子场论中有关费曼图的一个新的一般定理，将具有内部虚粒子圈的图与不具有这种圈的图联系了起来。

费曼理解量子化的“杨–米尔斯理论”的方法，对20世纪60年代末物理学的重大发展具有至关重要的意义。首先，史蒂文·温伯格在一个特定且更为现实的杨–米尔斯理论的背景下，重新发现了格拉肖的电弱统一模型。在这种理论中，弱力玻色子的起始质量原则上可以为零，即保持规范对称性，而它们的质量随后会因该理论的动力学演化规则而自然而然地增加。

这是关于弱相互作用的一个很好的潜在理论。但仍然存在一个问题：这个理论能够“重正化”吗？换言之，在对物理量进行预测时，是否所有的无穷大量都能被有效地移除，就像费曼、施温格以及朝永振一郎在QED中所做的那样？1972年，一位年轻的荷兰研究生赫拉尔杜斯·特霍夫特（Gerardus’t Hooft）和他的导师马丁努斯·韦尔特曼（Martinus Veltman）在费曼方法的基础上对这些理论进行了量化处理，并给出了肯定的答案。格拉肖–温伯格理论魅力骤增！在接下来的5年中，这一理论的正确性逐渐被实验所证明，包括理论预测应当存在的3种新的大质量规范性玻色子；1984年，欧洲核子研究组织发现了大质量玻色子本身。为“电弱统一理论”的发展做出贡献的研究者，包括格拉肖、温伯格以及阿卜杜斯·萨拉姆（Abdus Salam，他也进行了与前两者类似的研究），还有特霍夫特和韦尔特曼，以及发现了弱力玻色子的实验物理学家们，相继都登上了诺贝尔奖的领奖台。

现在，理论学家们已经拥有了一套很好的描述电弱相互作用的基础理论，但是强相互作用仍然令人感到困惑。在这方面，与盖尔曼曾经用来分类夸克的$SU(3)$对称群相关的一个更加复杂的杨–米尔斯理论版本似乎可以解释清楚。此处的“3”所代表的并非夸克的不

同“味”（“上”、“下”和“奇”），而是对应于一些被称为“色”的新的内部量子数。这一理论似乎可以用来描述夸克结合在一起形成强子的唯象特征。该理论的名称与QED相似，我们称之为“量子色动力学”（quantum chromodynamics），即QCD。然而，强相互作用仍然是短程的，看起来还是需要大质量的玻色子。

但更重要的是，如何用这一新的强力来解释质子内部的物体（无论它们被称为“部分子”还是“夸克”）彼此之间似乎不发生相互作用这一事实呢？不到一年，人们就有了答案，而答案又回到了盖尔曼和洛关于电子电荷有效值在小尺度上加强的研究结果上。

随着电弱统一理论的发展，量子场论声望渐高。1973年，普林斯顿大学的年轻理论物理学家戴维·格罗斯（David Gross）决定推翻这个唯一有望解释强相互作用的理论。格罗斯在伯克利受到核民主模型的耳濡目染，这个模型认为通过粒子和场来解释强相互作用是错误的。他和他聪慧的学生弗兰克·维尔切克决定对“杨–米尔斯定理”的短距离行为进行检验，尤其是QCD中的短距离行为，其目的是证明QCD中“色荷”的有效大小会像QED中的电荷一样，在短距离内由于在更长距离上的虚粒子的屏蔽作用而变大。如果真是这样的话，那么这种QCD理论将无望解释费曼和比约肯揭示出来的SLAC的标度无关性结果。出于一些不同的原因，哈佛大学的悉尼·科尔曼的一位研究生戴维·波利策（David Politzer）也独立研究了QCD的标度无关性。

令三位科学家感到意外的是，他们在得到的方程中观察到了与预期恰好相反的行为（在检查出来并修正了各种关键的符号错误以后），但仅限于像QCD这样的杨–米尔斯理论。在短距离上，夸克的有效“色荷”不会变大，而是会变小！理论物理学家们把这种显著的、意想不到的性质称为“渐近自由”（asymptotic freedom）。格罗斯、维尔切克率先对这一发现进行了后续研究，波利策紧随其后，他们发表了一系列的论文，其中原样采用了费曼为了与SLAC的标度无关性实验结果进行比较而发展出来的公式。他们发现，QCD不仅能够解释标度

无关性，而且由于夸克间的相互作用不为零，但又弱于它们非渐近自由条件下的值，所以QCD也可以用来计算对于标度无关性行为的修正，这种修正是可观测的。

与此同时，在这一时期，费曼对于所有令人振奋的新结果持怀疑态度。他已经太多次地看到，理论物理学家们被新的恢宏构想冲昏头脑，随波逐流。而最有趣的一点是，这些新结果采用了费曼的方法，即他为理解标度无关性实验结果和处理杨–米尔斯理论而开创的技术手段，然而他并未因此而停止怀疑。

到了20世纪70年代中期，费曼终于确信这些观点是非常有价值的，因此他开始以极大的热情详细跟进这些观点，并为此投入了大量的精力。费曼与博士后研究员里克·菲尔德（Rick Field）一起计算了大量可能在QCD中观测到的物理效应，使QCD研究进入了实验与理论紧密结合的令人兴奋的新时代。这是一项艰巨的工作，因为要使QCD中的相互作用弱至理论物理学家能够进行可靠计算的程度，其能量标度就要比实验学家所能达到的要略高一些。因此，尽管对“渐近自由”的预测得到了初步的证实，但至少又过了10年，直到20世纪80年代中期，费曼去世之前，这一理论才得到充分的证实。在此之后又过了20年，格罗斯、维尔切克和波利策才因为他们在“渐近自由”方面的工作而获得诺贝尔奖。

在费曼最后的岁月中，尽管他对QCD的兴趣丝毫未减，但他仍未完全接受这一理论。因为，尽管这一理论可以很好地解释SLAC标度无关性，实验人员也观察到了后来预测的标度偏差，但实际上，对QCD相互作用强度进行的所有测量都表明，在短距离和高能量下，QCD相互作用的强度变弱；而在与之相反的长距离尺度上，这个理论则过于复杂，难以应用。如此一来，这一理论就无法经受费曼“黄金标准”的检验：它无法解释，为什么我们在自然界中找不到自由夸克。

传统的观点认为，QCD作用在远距离上变得很强，因而夸克之间的力不随距离而改变。所以，原则上，要将两个夸克完全分开需要无

限大的能量。这一预期得到了复杂的计算机运算的支持，费曼在波士顿研制希利斯的“连接机”时率先进行了这类运算。

但是，在费曼看来，计算机的运算结果于物理学的理解而言仅仅是一种启示。正如他许多年前在贝特手下学到的那样，直到他对何以发生某种情形有了分析性的理解，并且得出可与实验数据进行比较的数字，他才会相信这些方程。但是，费曼并没有得到这样的计算结果。在那之前，他不愿停下探索的脚步。

正是在这个时候，我和理查德·费曼有了我在本书开头提到的那次会面。那是我第一次见到他，当时他来温哥华做报告，极其兴奋地讲述了一个想法，他认为这个想法可以证明QCD存在“禁闭”（confining），即我们无法观测到单独的自由夸克的问题。这个问题在三维空间中很难处理，但是他很确定，在二维空间中他能够发展出一种分析方案，并最终以令他满意的方式解决这个问题。

后来，费曼继续为推进QCD的发展而努力，同时也和癌症进行着抗争。1979年他接受了第一次治疗，1987年癌症又再次出现。随着名气的日益增长，令他分心的事也越来越多，包括围绕其畅销自传而展开的各种活动，以及在“挑战者号”失事调查委员会的工作经历（我们曾经提到，他亲自揭开了造成航天飞机爆炸这一悲剧性事件的原因）。他的目标尚未实现，但他的人生已走到终点。时至今日，计算机的运算能力已经有了极大的提高，为“禁闭”的概念提供了越来越多的支持，大量新的理论技术使以复杂的新方法来处理杨–米尔斯理论成为可能。然而，我们仍然没有找到一种简单而巧妙的方法，来证明这一理论必须让夸克禁闭。没有人怀疑这一点，但是“费曼检验”（如果可以这样称呼的话）仍未完成。

可是，斯人已逝，贡献永存。处理杨–米尔斯规范理论和引力的唯一真正高效的方法需要用到费曼的路径积分形式，它实际上已成为现代物理学家唯一使用的量子场论方程。但更重要的是，路径积分的结果、渐近自由的性质以及强相互作用与弱相互作用的可重正性，为物

理学家指出了一个新的方向，使他们对科学真理有了新的理解。如果费曼还活着，他一定会为自己在QED方面所做的工作而感到骄傲，而不再觉得自己只是找到了一种掩盖问题的巧妙方式。

当距离尺度发生改变时，为了消除能量越来越高的虚粒子的影响，人们会对理论进行修改，从而将理论重正化。费曼的路径积分方法使物理学家们能够系统地研究理论的预测是如何随着人们对距离尺度的改变而变化的。因为在他的表述中，量子理论是通过具体考察时空路径而建立起来的，我们可以“积分掉”（从整体上平均）与这些尺度相适应的路径中的微小扰动，从而只考虑不再有这种扰动的路径。

诺贝尔物理学奖得主肯尼思·威尔逊（Kenneth Wilson）指出，这种从整体上平均的做法意味着由此产生的理论，即“有限理论”，实际上只是一种在截断尺度之上描述自然的“有效理论”，其中路径上的微小扰动被积分掉了。

费曼处理无穷大量的技术不再是一种临时策略，而是物理研究的一种必要手段。因为现在我们已经意识到，我们不应再期望一个理论能始终不变地在所有能量和距离尺度上起作用。随着研究的目标尺度变得越来越小，没有人会指望物理学中最有效也最受欢迎的QED理论仍是对自然的恰当描述。事实上，正如格拉肖、温伯格和萨拉姆所证明的那样，在足够高的能量尺度上，QED与弱相互作用相结合，形成了一个新的统一理论。

现在我们明白了，所有的物理理论都只能在一个有效的尺度范围内描述自然。绝对的科学真理，即那种在所有尺度下、所有时间节点上都正确的理论，尚不存在。因此，物理学需要重正化的理由很简单：“无限理论”，即可以外延推演到任意小的距离尺度上的理论，是不正确的，无穷大量便是这类理论错误的标志之一。这样的推演超出了理论的适用范围。因此，我们可以在一定的小尺度上截断一个理论，这样我们只是忽略了在这些小尺度上不可避免地改变一个理论的未知的新物理现象。此时，我们得到的答案是有意义的，这正是因为

如果我们想要探索大尺度上的物理现象，我们可以忽略这些存在于微小尺度上的未知的新现象。像QED这样合理的、可重正化的理论，是不会受到远小于我们可以对其进行实验验证的尺度上的物理学现象影响的。

因此，费曼希望我们能用某种方式解决QED中的无穷大问题，而不进行理论的重正化，这种想法是不切实际的。我们现在知道，他的表述使我们能够系统地忽略我们不理解的东西，这是我们可能拥有的最佳表述。简而言之，费曼竭尽所能进行的数学修正，绝不只是掩盖了场论中的问题，而是真实地诠释了他一直希望有一天能够由他来发现的新的物理原理。

费曼一定会为这种新的理解而感到满意，因为这种理解不仅为他的早期工作赋予了新的意义，同时还保留了神秘感和新鲜感。已知理论皆非终极理论，这或许正是费曼所乐见的情形。他曾说过："人们问我：'你是在寻找物理学的终极法则吗？'不，我不是，我只是想更多地了解这个世界。如果最终有一个简单的终极法则可以解释一切，那就太好了，发现它是一件很棒的事情。如果这条法则就像是被几百万层外皮包裹的洋葱一样，我们在层层剥开它的过程中感到疲弱而厌倦，那么它可能就是这个样子的。无论真理以什么方式出现，都是自然的，它只能以自己的存在方式展现出来。"

与此同时，在费曼工作的基础上，物理学研究在20世纪70年代取得了显著进展，使许多物理学家转向了另一个研究方向。在电弱统一和渐近自由理论成功之后，出现了另一种可能性。如盖尔曼和洛所示，QED相互作用在小尺度上会变强；而格罗斯、维尔切克和波利策则证明了，QCD相互作用在小尺度上会变弱。如果我们能够在一个非常小的尺度上进行研究（我们估计这个尺度可能比质子尺寸小16个数量级，而且比当前最好的加速器能够探测到的极限要小12个数量级），那么所有已知力或许都会统一到单一理论中，具有单一强度。这种被格拉肖称为"大统一"的可能性，成为20世纪80年代粒子物理学

研究的主要驱动力。后来，物理学家们发现，弦论使引力与其他三种作用力的统一成为可能，“大统一”理论便被纳入了一个更宏大的目标之中。

不过，费曼对此仍然表示怀疑。终其一生，他都反对过度地解读数据，他目睹了大量智慧而巧妙的理论被弃置一旁。此外，他也知道，除非理论物理学家们愿意并且能够继续在冰冷枯燥的实验行为中检验他们的想法，否则他们在自欺欺人的可能性仍然很大。他明白，正如他自己常说的，最容易被愚弄的人就是自己。

当他抨击伪科学家、外星劫持“专家”、占星家和江湖医生时，他试图提醒我们，人们往往会认为那些自然而然地发生在我们每个人身上的事，似乎都具有某种特殊的价值和重要的意义，即使它只是个意外。我们必须对这种貌似本能的行为加以防范，而唯一的途径就是坚守经验现实的约束。因此，在面对诸如“物理学即将终结”“物理学的终极法则即将出现”这样的言论时，费曼只是简单地道出了自己的经验之谈：“我这一生都是这样的……在我一生中，一直都有人相信答案就在不远处。”

费曼是20世纪最杰出的科学家之一。如果说我们能从他的卓越职业生涯中学到什么，那就是，揭开自然界隐藏的秘密是一种少有的荣幸，哪怕只揭开其中一个微小的片段，都会令人自然地萌生出兴奋与狂妄之感。然而，我们务必要让自己回归理性与清醒。我们必须认识到，无论我们已经对自然界有了多么深入的认识，如果我们愿意继续探索，仍然会有更多的惊喜等待我们去发现。对于像理查德·费曼这样无畏且睿智的冒险者来说，这就是生活的意义。

---

1. 《芬尼根的守灵夜》被认为是“无法翻译”的作品，对“Three quarks for Muster Mark”这句话的中文翻译存在很多争议，有“给穆斯特·马克三个夸克”、“向麦克老大三呼夸克”、“给穆斯特·马克的三声夸克”以及“为马克检阅者王，三声夸克”等多种译法。——译者注

2. 艾斯即Aces，扑克牌中的A。——译者注

后记

性格即命运

> 我认为，我们所做的就是探索——我们在尝试尽力发掘这个世界的更多奥秘……我对科学的兴趣很简单，就是去更多地发现和理解这个世界。我发现得越多，发现这件事就变得越美妙。
>
> ——理查德·费曼

1988年2月15日，临近午夜之时，理查德·费曼与世长辞，享年69岁。在他短暂的一生中，他不仅改变了世界（至少改变了我们对这个世界的理解），也改变了所有与他相遇的人的生活。凡有幸认识他的人都深受他的影响。他是如此独特，以至于我们必须对他另眼相看。如果说性格即是命运，那么他似乎注定会发现伟大的事物，这些发现是他极致的勤奋、无尽的精力、严谨的态度与聪明的头脑相结合的产物。

诚然，费曼成就斐然，但倘若他愿意更多地倾听周围人的想法并向他们学习，而不是坚持由自己去发现一切，他本可以取得更大的成就。不过，取得成就并不是他的目的！他的目的是理解这个世界。对他而言，真正的乐趣在于亲自发现某种东西，即使它早已为人所共知。不止一次，当他知道自己的某个发现被别人抢先了一步时，他的反应并不是失望，而是："嘿！我们做对了，这不是很棒吗？"

来自周围人的评价或许可以帮助我们最大限度地了解一个人。因此，为了完成对理查德·费曼的完整刻画，我决定加入一些这样的评

价。这些讲述可以令我们对费曼的非凡人生形成更深刻的认识，其中的一两个故事就使我更好地抓住了费曼的本质。

首先，我们来看一位名叫理查德·舍曼（Richard Sherman）的年轻学生的经历，他曾有幸在费曼的办公室待了一个下午：

> 我至今还能回忆起那次特别棒的经历。那是在我读大一的时候，当时我正在做超导性的研究。一天下午，我去他的办公室讨论结果……我开始在黑板上写公式，而他则开始快速地进行分析。我们被一个电话打断了……费曼马上从超导性转到了某个高能粒子物理问题上，进入了其他人正在进行的异常复杂的计算之中……他跟那个人讨论了大约5到10分钟。当他讲完之后，他挂断电话，从我们中断的位置开始继续讨论我的计算……电话铃又响了，这次是一个研究理论固体物理的人打来的，内容与我们正在讨论的完全不相关。但是他就那样告诉对方："不、不，那样做是不对的……你需要这样做……"类似这样的事情持续了大约3个小时——电话内容涉及不同类型的技术交流，每次都在一个完全不同的研究领域，并且涉及不同类型的计算……这太令人震惊了。后来我再也没经历过类似的事情。

费曼在思维机器公司的暑期工作开始后，丹尼·希利斯也有过一段颇为相似的经历：

> 通常，当我们中有人向他寻求建议时，他会粗暴地拒绝道："那不是我的专业。"我永远也弄不明白他的专业到底是什么，但是这无所谓，因为他大多数时间都在处理这些"非专业"的问题……他往往会在拒绝了几天之后又回过头来说："我一直在想你那天提出的问题，在我看来……"但是，理查德讨厌的是，或者至少假装讨厌的是，被要求提出建议。那么为什么人们总是向他寻求建议呢？因为即使理查德不懂，他看上去也总是比其余所有人懂得更多。而且无论他理解什么，他都可以教会别人。理查德会带给人

> 一种感觉，就像孩子们第一次被长者当作成年人来看待一样。他从不害怕说真话。

对于费曼来说，解决问题不是一种选择，而是一种需要。他的大学好友特德·韦尔顿很早就意识到了这一点。费曼一旦开始解决问题便无法停下来，他也不想停下来，因为这正是他所擅长的事情，即使是绝症也不能阻止他。他在加州理工学院的同事戴维·古德斯坦（David Goodstein）向电影制片人克里斯托弗·赛克斯（Christopher Sykes）讲述了这样一个故事：

> 有一天，费曼的秘书海伦·塔克打电话给我，平静地告诉我，费曼得了癌症，下个星期五就要进医院动手术了……就在那个周五，距离手术还有一个星期的时候……我告诉他有人在我们的一项计算中发现了一个明显的错误，我不知道那个错误是什么。我问他是否愿意花点儿时间和我一起找到它。他说："当然可以。"星期一的早上，我们在我的办公室见了面，他坐下来开始工作……大部分时间，我只是坐在那里看着他，心里想："看看这个男人，他正身处绝境。他不知道自己是否能活过这周，但他还在处理二维弹性理论中的一个不重要的问题。"但是，他被这个问题吸引了，整天都在工作。最后，在晚上六点的时候，我们断定这个问题是相当棘手的，于是我们放弃了，然后回了家。两个小时后，他打电话到我家里，告诉我他已经解决了这个问题。他无法停止对这一问题的思考，最后，他终于找到了这个晦涩至极的问题的答案。他很兴奋，简直得意扬扬。……此时距离他的手术还有4天……我觉得你可以从这件事中看出费曼的所作所为是受什么驱使的。

对费曼而言，这样的过程正是他所喜爱的。这使他得以从单调乏味的现实生活中解脱出来。Mathematica软件的创始人史蒂芬·沃尔弗拉姆年轻时曾就读于加州理工学院，是费曼的门生，他也描述了类似的事情：

我记得大概是1982年，在费曼的家中，我们谈到了当时某些不容乐观的形势。在我准备离开的时候，费曼拦住了我，并说道："你得明白，你和我都是幸运的。因为无论发生什么，我们总是有我们的物理学。"……费曼热爱物理学研究。我认为他最喜欢的是研究的过程：去计算，把事情弄清楚……他似乎并不关心最终的结果是重要、伟大，还是怪异而深奥。对他来说，最重要的是发现事物的过程……一些科学家（可能也包括我自己）的研究动力是构筑宏大的知识体系。我觉得，费曼的研究动力——至少自我结识他以来——更多地来自实际从事科学研究的纯粹的快乐。他似乎最喜欢将自己的时间用于理解事物的本质并进行计算。而且他极其擅长计算。在我所知的范围内，他是有史以来最出色的人体计算器，总让我感到不可思议。他会开始计算某个问题，在纸上写满计算过程。最后，他总是会得到正确的结果！但是他通常并不会满足于此。一旦他得到了答案，他就会回过头去检查这些结果，并尽量弄清楚为什么这些结果如此显而易见。

当费曼对某事或某人感兴趣时，他的样子极具魅力。看起来，他会将自己所有的能量、注意力以及智慧都集中到这件事或者这个人上面。这就是为什么当费曼来听组会并留下来提问时，会有那么多人深受其影响。

说起费曼，同事们的反应通常都十分强烈。因此，我们不仅可以透过这些反应来了解费曼的特质，也能看出这些同事的性格特点。比如，我问过戴维·格罗斯和弗兰克·维尔切克（他们两人性格迥异，共同发现了量子色动力学中的"渐近自由"），费曼对于量子色动力学和他们在1973年得到的结果有何反应。戴维告诉我他被激怒了，因为费曼没有对此展现出足够的兴趣，戴维认为这主要是因为费曼没有推导出结果。随后，当我与弗兰克谈论相同的话题时，他告诉我，费曼表现出来的兴趣令他感到既惊讶又自豪。他说费曼对此持怀疑态度，但是弗兰克认为，在他们刚刚得出结果的那几年，费曼的反应是合乎情理的。我猜他们两个人都是对的。

最有说服力的一个故事是我的朋友巴里·巴里什告诉我的。基于我在本书写作过程中对理查德·费曼的了解，这个故事最生动地刻画出了他的性格特质，也最好地体现了指导他生活和物理研究本质的原则。在费曼去世之前，巴里·巴里什和他一起已经在加州理工学院共事了20年。巴里与费曼住得相对较近，因此他们经常见面。他们的住所距离校园都只有3英里左右，所以有时候，他们不开车，而是步行去上班，有时两个人一起走，有时候分开走。有一次，费曼问巴里，他是否在某条街上看到了某幢房子，并问他对这幢房子有什么看法。巴里不知道这幢房子，因为和大多数人一样，他找到了一条自己最喜欢的路线，并且每次都沿着这条路上下班。而他通过这件事了解到，理查德的做法恰恰相反，他会尽量避免重复的路线。

致谢和参考书目

就像我在本书前言中所说的那样，我之所以在詹姆斯·阿特拉斯（James Atlas）的提议下同意写这本书，原因之一是它为我提供了一个机会和动力，对费曼所有的科学论文进行不同程度的回顾与阅读。作为一名物理学研究者，我知道这样的经历会给我带来不少启发，使我能够更好地理解物理学发展的实际历程，而不是物理学家在精炼和简化那些曾经晦涩难懂的技巧时不可避免地发展起来的修正后的历史。

尽管如此，我并不佯称自己曾从事过任何基础的历史研究。我过去确实做过一些历史性的调查，并为此去档案馆查找过信件之类的原始资料，但就理查德·费曼而言，我所需的原始资料几乎都已经得到了精心的整理，且已经编纂出版。作为补充，大家可以去阅读另外两本佳作，一本主要讲述了费曼的生平，另一本则详细介绍了他在量子电动力学方面的工作；此外，对费曼的研究感兴趣的专业读者可以直接阅读作为本书写作基础的几乎所有材料。

此外，我要感谢各位物理学同行，他们是谢尔登·格拉肖、史蒂文·温伯格、默里·盖尔曼、戴维·格罗斯、弗兰克·维尔切克、巴里·巴里什、马蒂·布洛克、丹尼·希利斯和詹姆斯·比约肯等。感谢他们向我讲述了他们对费曼的印象，以及他们与费曼相处的过往经历。我还要感谢哈什·马瑟（Harsh Mathur）在费曼的凝聚态物理学研究方面对我的帮助与指导。

本书的主要信息来源包括费曼发表的论文和著作，以及有关费曼的公开出版物。感兴趣的读者可以找来作为参考，并且可以从中找到

本书中引用的费曼说过的每一句话。这些文献不仅包括费曼在量子电动力学方面的工作，还包括他的所有主要论文，以及一本有关他生平的精彩而权威的个人传记。此外还有一些有价值的参考资料，包括最近出版的一本富有启发性的费曼书信集，以及认识费曼的人、科学家和其他人士对费曼的各种反思的汇编：

QED and the Men Who Made It, Sylvan S. Schweber, Princeton University Press, 1994.

Selected Papers of Richard Feynman, Laurie Brown (ed.),World Scientific, 2000.

Genius: The Life and Science of Richard Feynman, James Gleick,Pantheon, 1992.

Perfectly Reasonable Deviations: The Letters of Richard Feynman, M.Feynman (ed.), Basic Books, 2005.

Most of the Good Stuff: Memories of Richard Feynman, Laurie Brownand John Rigden (eds.), Springer Press, 1993.（1988年的一个全天研讨会的会议记录，一些主要科学家撰写了他们对费曼的反思。）

No Ordinary Genius: The Illustrated Richard Feynman, Christopher Sykes (ed.), W. W. Norton, 1994.

The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman, Jagdish Mehra, Oxford University Press,1994.

三本关于物理学史和其他物理学家的有用资料包括：

Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s, Laurie M.Brown, Max Dresden, Lillian Hoddeson (eds.), Cambridge University Press, 1989.

Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in the Twentieth Century Physics, G. Johnson, Vintage, 1999.

Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics, David Kaiser, University of Chicago Press, 2005.

最后，由费曼本人撰写（或参与创作）的一些科学著作，包括：

QED: The Strange Theory of Light and Matter, Princeton University Press, 1985.

The Character of Physical Law, MIT Press, 1965.

The Feynman Lectures on Computation, A. J. G. Hey and R. W. Allen(eds.), Perseus, 2000.

The Feynman Lectures on Gravitation, with F. B. Morinigo, and W. G.Wagner; B. Hatfield (ed.), Addison-Wesley, 1995.

Statistical Mechanics: A Set of Lectures, Addison-Wesley,1981.

Theory of Fundamental Processes, Addison-Wesley, 1961.

Quantum Electrodynamics, Addison-Wesley, 1962.

Quantum Mechanics and Path Integrals, with A. Hibbs, McGraw-Hill,1965.

The Feynman Lectures on Physics, with R. B. Leighton and M. Sands,Addison-Wesley, 2005.

Nobel Lectures in Physics, 1963–72, Elsevier, 1973.

Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures, with S. Weinberg, Cambridge University Press, 1987.

The Meaning of It All: Thoughts of a Citizen Scientist,Helix Books,1998.

Feynman's Thesis: A New Approach to Quantum Theory, Laurie Brown (ed.), World Scientific, 2005.